

# Generering av digital høydemodell fra ASTER opptak - Kvalitet og begrensninger.

Oskar Eggan  
Institutt for geofag  
Avdeling for naturgeografi  
Universitetet i Oslo

5. mai 2005



# Forord

Hovedfagsoppgaven inngår som en del av Cand. Scient. studiet ved studieretningen Geometrikk, Institutt for Geofag, Universitetet i Oslo. Oppgaven er gitt og veiledet av Bernd Etzelmüller. Medveileder for oppgaven var Bjørn Wangestein.

Retter en spesiell takk til Bernd Etzelmüller, for støtte og engasjement, og til Bjørn Wangenstein som har hjulpet meg en del med tilrettelegging av data samt gitt meg råd og veiledning omkring flere av temaene i oppgaven. Vil også takke Trond Eiken for å stadig være tilgjengelig for spørsmål på datarommet.

Ellers vil jeg takke familien og kjæresten min som har vært så tålmodige og hjelpsomme under studietiden.

Tilslutt må jeg ikke glemme å takke alle medstudenter for godt studiemiljø, samt mange artige turer og fester.

Blindern, mai 2005.

Oskar Eggan





# Innhold

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Innledning</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Teoretisk Bakgrunn</b>                                       | <b>5</b>  |
| 2.1      | ASTER . . . . .   | 5         |
| 2.1.1    | ASTER instrumentet . . . . .                                    | 5         |
| 2.1.2    | ASTER data . . . . .  | 7         |
| 2.2      | Digitale Høydemodeller . . . . .                                | 8         |
| 2.2.1    | Topografiske parametere . . . . .                               | 8         |
| 2.2.2    | Vurdering av kvalitet i digitale høydemodeller . . . . .        | 10        |
| 2.2.3    | Generering av høydemodeller basert på satellittbilder . . . . . | 12        |
| 2.2.4    | Potensiell høydenøyaktighet til ASTER systemet . . . . .        | 12        |
| <b>3</b> | <b>Datasett</b>   | <b>15</b> |
| 3.1      | Testområde . . . . .  | 15        |
| 3.1.1    | Oslo-området . . . . .  | 15        |
| 3.1.2    | Jostedalsbreen . . . . .  | 17        |
| 3.2      | Testmateriale . . . . .   | 17        |
| 3.2.1    | Referansemodell . . . . .                                       | 17        |
| 3.2.2    | Kontrollpunkter . . . . .                                       | 17        |
| 3.2.3    | Markslagskart . . . . .   | 18        |
| 3.2.4    | ASTER opptak . . . . .  | 18        |
| <b>4</b> | <b>Metode</b>   | <b>19</b> |
| 4.1      | Førprosessering . . . . .                                       | 21        |
| 4.2      | Generering av ASTER DHM i<br>PCI Orthoengine . . . . .          | 22        |
| 4.2.1    | Oppsett av stereomodellen . . . . .                             | 22        |
| 4.2.2    | Stereokorrelasjon . . . . .                                     | 24        |
| 4.2.3    | 3D stereo framskjæring . . . . .                                | 26        |
| 4.2.4    | Editering av høydemodellen . . . . .                            | 26        |
| 4.3      | Kvalitetsvurdering . . . . .                                    | 30        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 4.3.1    | Differansemodellene . . . . .                       | 31        |
| 4.3.2    | Beregning av helning og aspekt . . . . .            | 32        |
| 4.3.3    | Topografisk Wetness Index . . . . .                 | 33        |
| 4.3.4    | Klassifikasjon av overflatedekke . . . . .          | 33        |
| 4.3.5    | Vurdering av nøyaktighet på breen . . . . .         | 35        |
| <b>5</b> | <b>Resultater</b>                                   | <b>37</b> |
| 5.1      | Oppsett av stereomodellen . . . . .                 | 37        |
| 5.2      | Høydemodellene . . . . .                            | 38        |
| 5.3      | Avvik innenfor ulik topografi og markslag . . . . . | 44        |
| 5.3.1    | Oslo-området . . . . .                              | 44        |
| 5.3.2    | Jostedalsbreen . . . . .                            | 48        |
| 5.4      | Beregning av topografiske parametere . . . . .      | 50        |
| 5.5      | Vurdering av nøyaktighet på breen . . . . .         | 52        |
| 5.5.1    | Bergsetbreen . . . . .                              | 52        |
| 5.5.2    | Nidgardsbreen . . . . .                             | 56        |
| <b>6</b> | <b>Diskusjon</b>                                    | <b>59</b> |
| 6.1      | Oppsett av stereomodellen . . . . .                 | 59        |
| 6.2      | Editering av høydemodellene . . . . .               | 60        |
| 6.3      | Kvalitetsanalyse av høydemodellene . . . . .        | 61        |
| 6.4      | Anvendelsesområder for ASTER DHM . . . . .          | 66        |
| <b>7</b> | <b>Konklusjon</b>                                   | <b>71</b> |
|          | <b>Referanser</b>                                   | <b>73</b> |
|          | <b>Tillegg</b>                                      | <b>79</b> |
| <b>A</b> | <b>Oppsett av stereomodell</b>                      | <b>79</b> |
| A.1      | Oslo-området . . . . .                              | 79        |
| A.2      | Jostedalsbreen . . . . .                            | 80        |
| <b>B</b> | <b>3D Visualisering av høydemodellene</b>           | <b>81</b> |

# Figurer

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.1  | ASTERs VNIR teleskop . . . . .                               | 6  |
| 2.2  | Stereo-opptaksgeometrien . . . . .                           | 6  |
| 3.1  | Studieområdene . . . . .                                     | 16 |
| 4.1  | Flytdiagram for metoden . . . . .                            | 20 |
| 4.2  | Kalibrering av radiansverdier . . . . .                      | 21 |
| 4.3  | Matchingen . . . . .   | 25 |
| 4.4  | Editering av høydemodell . . . . .                           | 27 |
| 4.5  | Korrelasjonskoeffisientene . . . . .                         | 29 |
| 4.6  | Geometrisk korleksjon av SWIR . . . . .                      | 34 |
| 4.7  | Utvelgelse av klassifiserte punkter . . . . .                | 35 |
| 5.1  | Skyggemodell fra Oslo-området . . . . .                      | 38 |
| 5.2  | Frekvensdistribusjon av JDHM1, JDHM2 og JDHM3 . . . . .      | 39 |
| 5.3  | Differansebilde fra Oslo-området . . . . .                   | 41 |
| 5.4  | Sammenlikning av koter fra Oslo-området . . . . .            | 42 |
| 5.5  | Skyggemodeller fra Jostedalsbreen . . . . .                  | 42 |
| 5.6  | Differansebilde fra Jostedalsbreen . . . . .                 | 43 |
| 5.7  | Sammenlikning av koter fra Jostedalsbreen . . . . .          | 44 |
| 5.8  | Høydeprofiler fra Oslo-området . . . . .                     | 45 |
| 5.9  | Høydeprofiler fra Jostedalsbreen . . . . .                   | 46 |
| 5.10 | Høydeavvik mot helning, ODHM . . . . .                       | 47 |
| 5.11 | Høydeavvik mot aspekt, ODHM . . . . .                        | 47 |
| 5.12 | Høydeavvik mot markslag, ODHM . . . . .                      | 48 |
| 5.13 | Høydeavvik mot helning, JDHM . . . . .                       | 49 |
| 5.14 | Høydeavvik mot aspekt, JDHM. . . . .                         | 49 |
| 5.15 | Høydeavvik mot markslag, JDHM . . . . .                      | 50 |
| 5.16 | Helningsavvik mot helning, ODHM . . . . .                    | 51 |
| 5.17 | Helningsavvik mot helning, JDHM . . . . .                    | 51 |
| 5.18 | Tilsigsområde og wetness index ifra Oslo-området . . . . .   | 53 |
| 5.19 | Tilsigsområde og wetness index ifra Jostedalsbreen . . . . . | 54 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 5.20 | Høydedifferanser over Bergsetbreen . . . . .                 | 55 |
| 5.21 | Høydedifferanser over Nidgardsbreen . . . . .                | 57 |
| 6.1  | Høydeprofil fra Jostedalsbreen . . . . .                     | 64 |
| 6.2  | Den kumulative nettobalansen for Nidgardsbreen 1963 - 2002 . | 65 |
| 6.3  | Generering av orthobilde . . . . .                           | 67 |
| B.1  | 3D visualiserng av modellen fra Oslo-området . . . . .       | 82 |
| B.2  | 3D visualiserng av modellen fra Jostedalsbreen . . . . .     | 83 |

# Tabeller

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 2.1 | Tekniske spesifikasjoner . . . . .                            | 7  |
| 3.1 | Utvalgt statistikk ifra studieområdene . . . . .              | 15 |
| 5.1 | RMSE verdier for residualene etter blokkutjevningen . . . . . | 37 |
| 5.2 | Deskriptiv statistikk fra ODHM . . . . .                      | 39 |
| 5.3 | Deskriptiv statistikk fra JDHM . . . . .                      | 39 |
| 5.4 | Deskriptiv statistikk fra Bergsetbreen . . . . .              | 55 |
| 5.5 | Deskriptiv statistikk fra Nidgardsbreen . . . . .             | 56 |
| 6.1 | Residualer: Eksempler fra litteraturen . . . . .              | 60 |
| 6.2 | RMSE DHM: Eksempler fra litteraturen . . . . .                | 63 |



# 1 Innledning

Digitale høydemodeller(DHM), utgjør en fundamental del i behandlingen av romlig geoinformasjon. Digitale høydemodeller er hovedkilden for data til dannelsen av andre modeller som helt eller delvis avhenger av topografien (Felicísimo 1994). De danner et felles grunnlag for georeferering og orthorektifisering av flyfoto, satellittbilder og andre datasett. DHM og dens derivative flater, som helning aspekt og kurvatur, er viktige komponenter i GIS-basert landskapsanalyse (Weibel og Heller 1991). Validiteten til disse datasettene og modellene er i stor grad avhengig av kvaliteten i høydemodellene de baserer seg på.

I dag finnes det god dekning i form av middels til høyoppløselige høydemodeller over store deler av jordas fastlandsoverflate. Disse er oftest basert på høydedata fra topografiske kart eller fjernanalyse i form av flyfoto og satellittbilder.

Fjernt beliggende, og vanskelig tilgjengelige strøk mangler ofte dekning av tilstrekkelig høy nøyaktighet. Mange fjellkjeder, regnskogsområder og ørkenområder som for eksempel landene i Sahelen, mangler kartlegging av høydedata (AlRousan et al. 1997). Andre steder kan årsaken til manglende dekning være restriksjoner fra myndighetenes side.

Innenfor mange disipliner er det også viktig å ha tilgang til multitemporære (og multispektrale) oppdaterte data. Overvåkning av utbredelsen av isbreer er blitt et viktig element innenfor arbeidet med å gjøre rede for globale klimaendringer. I denne sammenhengen blir data ifra satellitt sett på som en svært viktig og nyttig kilde til informasjon. Kääb (2002), Kääb et al. (2002) viser hvordan ASTER DHM og Orthobilder kan benyttes i arbeidet med kartlegging og overvåkning av isbreer. I disse sammenhengene har høydedata fra satellitter i de senere årene blitt et mer kostnadseffektivt alternativ til flybilder. Satellittene går i kontinuerlig bane rundt jorda og gjør opptak, og bilder fra tilnærmet hele kloden blir gjort tilgjengelige for nedlasting via internett. Hvert datasett inneholder ofte flere bånd med opptak ifra store deler av det radiometriske spekteret som samtidig, sammenliknet med flybilder, dekker over et enormt område. De er raskere og enklere å prosessere og

krever mindre manuelt arbeid. Generering av høydemodeller fra satellittbilder er en mer automatisert prosess i forhold til tradisjonell fotogrammetri og landmåling.

Et av ankepunktene ved bruk av satellittbilder i motsetning til flyfoto har vært den relativt lave oppløsningen som det er mulig å oppnå. Nyere høyoppløselige satellittsystemer som IKONOS og Quick Bird (begge 1 meter) er i ferd med å endre på dette (Li 1998). Et annet problem er at prisen for opptak fra middels til høyoppløselige satellittsensorer har vært relativt høy, slik at dette har virket begrensende for utbredelsen av denne typen data innenfor ulike miljøer.

I de seneste årene har det kommet stadig flere satellitter med muligheter for stereo-opptak. Noen av disse baserer seg på stereo-opptak fra to forskjellige baner, såkalt "across-track stereo" (Landsat-TM, SPOT, IRS). Andre satellittsystemer kan gjøre stereo-opptak ifra samme bane (along-track stereo) ved å forandre kameraretningen (EROS A1), eller ved å ha flere kameraer som peker i forskjellige retninger (ASTER, MOMS). Noen systemer har mulighet til å peke kameraet i alle retninger og kan derfor gjøre opptak både along-track og across-track (IKONOS, QUICKBIRD). Stereobilder tatt ifra samme bane har den fordel at de ikke inneholder store forskjeller i belysning eller overflatedekke slik som bilder tatt med stort tidsrom imellom kan ha. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) sine stereomuligheter, som skal studeres nærmere i denne oppgaven, er et eksempel på et along-track stereo system.

I takt med økningen av antall nye satellittsystemer har det naturlig nok blitt publisert en rekke artikler som beskriver nøyaktigheten i høydemodeller og dens derivative flater ifra disse forskjellige systemene. AlRousan et al. (1997), Gudan og Dowman (1988), Sasowsky et al. (1992), Bolstad og Stowe (1994) og Giles og Franklin (1996) ser på nøyaktigheten i høydemodeller ifra SPOT. De tre sistnevnte vurderer i tillegg nøyaktigheten i helning og aspekt ifra SPOT deriverte høydemodeller. Li (1998) vurderer det geometriske potensialet til de nye høyoppløselige satellittbilde-systemene Quick Bird (1-meters oppløsning), IKONOS (1-meters oppløsning) og Orbview-1 (1-, 2- og 4-meters oppløsning). Like før arbeidet startet med denne oppgaven, og imens det ble utført, har også en del artikler omkring validering av høydemåling ifra ASTER blitt publisert (Kääb (2002), Toutin (2002), Toutin og Cheng (2002), Hirano et al. (2003), Kamp et al. (2003) og Cuartero et al. (2004)).

Temaet for denne oppgaven er altså generering av høydemodeller fra ASTER opptak. Det vil ikke bli fokusert på å utvikle egne, eller benytte seg av andres sofistikerte metoder for å finne og korrigere feil i høydemodeller. Isteden vil de mulighetene og metodene som er innebygd i programvarepak-



ken PCI Geomatica V.8.3. i all hovedsak bli benyttet. Et viktig poeng er, ved hjelp av editeringsverktøyet i programvaren, å finne og rette opp feil i modellen før den endelige høydemodellen genereres. Det vil bli generert flere modeller ifra hvert område med ulike grad av editering for å vurdere effekten av disse metodene.

Opptak ifra to topografisk og vegetasjonsmessig ulike regioner vil danne grunnlaget for modellene. På denne måten kan effekten ifra disse attributtene enklere avledes. Samtidig gir dette mulighet for en mer helhetlig vurdering av potensialet for generering av høydemodeller ifra ASTER opptak.

Ulike kvalitative og kvantitative metoder blir tatt i bruk for å vurdere den absolutte og relative nøyaktigheten til høydemodellene.

Utvalgte topografiske parametere vil bli generert ut fra høydemodellene. Kvaliteten på disse vil kunne fortelle mye om den relative nøyaktigheten i modellene, og i hvilken grad høydemodeller ifra ASTER egner seg som kilder for slik informasjon.

Satellittbilder har vist seg nyttig i overvåkning av frontposisjon, likevektslinje og hastigheten ved breer (GLIMS-prosjektet). På grunn av stor usikkerhet i høydeverdiene har ikke måling av vertikale forandringer på breene ved hjelp av høydemodeller ifra satellittbilder vært like utbredt. I denne oppgaven vil det bli gjort en liten vurdering hvordan DHM ifra ASTER kan benyttes til dette formålet.

Med utgangspunkt i resultatene vil det bli diskutert på hvilke områder og i hvilken grad høydemodeller ifra ASTER kan anvendes.



## 2 Teoretisk Bakgrunn

### 2.1 ASTER

Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) er et samarbeidsprosjekt mellom NASA og det Japanske departementet for økonomi, handel og industri (METI) og the Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC). ASTER instrumentet er, sammen med 4 andre sensorer, montert ombord terrasatelliten som ble skutt opp 18. Desember 1999. Terra går i en såkalt polar sol-synkron bane i en høyde av ca. 715 km, og passerer overflaten omtrent kl 10.30 lokal soltid. Teleskopene kan styres  $\pm 8.5^\circ$  til sidene slik at satellitten får en repitisjonssyklus på 16 dager.

#### 2.1.1 ASTER instrumentet

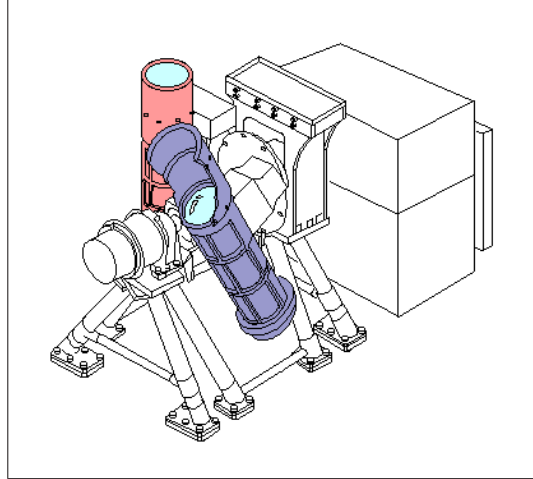
Instrumentet består av tre forskjellige subsystemer som hver er utstyrt med et eget teleskop. Disse er VNIR, SWIR og TIR.

VNIR-teleskopet gjør opptak i tre bånd i den synlige og nærinfrarøde delen av spekteret med 15 meters oppløsning. Detektorene for hvert av båndene består av 5000 CCD'er hvorav kun 4000 til enhver tid er i bruk. Dette betyr at hver scene dekker 60 kilometer av jordoverflaten i bredde.

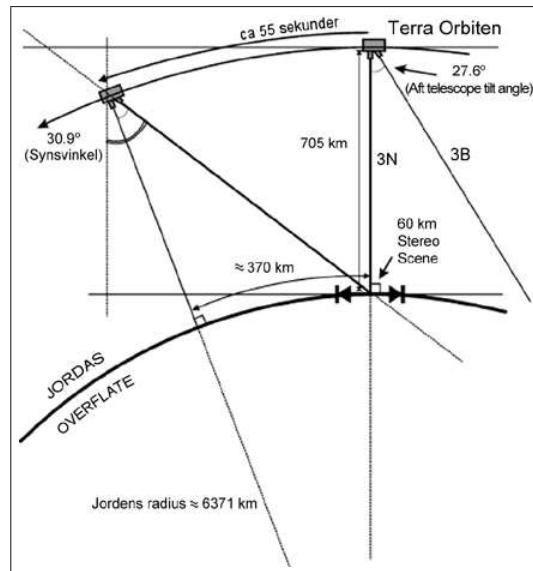
I tillegg har VNIR subsystemet et ekstra teleskop som peker skrått bakover (figur 2.1). Dette gjør opptak i den nærinfrarøde delen av spekteret, nøyaktig likt bånd 3 i det nadir-pekende teleskopet. Dette gir mulighet for stereo-opptak av samme punkt på bakken med svært liten tidsforskjell mellom opptakene (ca. 55 sekunder).

SWIR-teleskopet og TIR-teleskopet gjør opptak henholdsvis i den kortbølgede infrarøde og den termisk infrarøde delen av det elektromagnetiske spekteret.

Et av målene for oppdraget var at ASTER instrumentet skulle skaffe skyfrie stereo-opptak av hele jordoverflaten innen en 6-års periode (Abrams 2000). Ved hjelp av dette ville det være mulig å generere høydemodeller som til sammen dekker tilnærmet hele kloden.



Figur 2.1: ASTERs VNIR teleskop. VNIR-systemet består av to teleskop. Ett som peker skrått bakover og ett annet som peker rett ned (Bildet er hentet ifra Asterweb (2004)).



Figur 2.2: Stereo-opptaksgeometrien. Skissen viser opptaksgeometrien for stereo-opptak til ASTER. (Modifisert figur ifra Hirano et al. (2003))

Tabell 2.1: Tekniske spesifikasjoner. Oversikt over noen av de viktigste egenskapene ved ASTER-systemet

| Tekniske spesifikasjoner     | Terra ASTER  |
|------------------------------|--|
| Synlige og nærinfrarøde bånd | 3  |
| Kortbølgede infrarøde bånd   | 6  |
| Termisk infrarøde bånd       | 5  |
| Muligheter for stereo        | Ja   |
|                              | Båndene 3N og 3B<br>(Nadir og bakoverpekende teleskoper) |
|                              | 0.78-0.86 $\mu m$  |
| Stereo geometri              | Along-track  |
| B/H ratio                    | 0.6  |
| Størrelse på pikslene        | 15 meter   |
| Dekning pr. scene            | 60 km $\times$ 60 km                                     |
| Satellitbane                 | Nær-polar synkronisert med sola                          |
| Høyde på satellittbanen      | 705 km   |
| Inklinasjonsvinkel           | 98.2°  |
| Repetisjonssyklus            | 16 dager   |

### 2.1.2 ASTER data

ASTER data blir levert i ulike nivåer etter graden de er blitt prosessert. ASTER level 1 data er det laveste nivået.

Det finnes to ulike typer level-1 data: Level-1A (L1A) og Level-1B (L1B). L1A defineres som rekonstruert uprosessert instrumentdata med full oppløsning. ASTER L1A data består av registrerte radiansverdier fra hvert enkelt bånd, samt de radiometriske og geometriske korreksjonskoeffisientene og annen tilleggsdata. Disse koeffisientene følger kun med og er ikke lagt til dataene ((ERSDAC) 2003). I ASTER L1B data er nettopp disse koeffisientene lagt til.

ASTER systemet kan produsere opptil 650 L1A scener per dag. Av disse vil cirka 150 bli prosessert til L1B. All data blir samlet hos Eros Data Center Distributed Active Archive Center (EDCDAAC), for lagring, distribusjon og videre prosessering til nye produkter av høyere nivå. Alle produktene blir lagret i Hierarkisk Data Format (HDF).

## 2.2 Digitale Høydemodeller

En modell av jordoverflaten som skal representere terrenget, er en tilnærming av den topografiske overflaten, basert på et sett høydeverdier gitt i et endelig sett med punkter i overflatedomenet (Etzelmuller og Sulebak 2000).

Termen Digitale høydemodeller(DHM) blir benyttet noe ulikt i litteraturen (Burrough (1986), Weibel og Heller (1991)). Moore et al. (1991) definerer en DHM som et ordnet array av tall som representerer den romlige fordelingen av høyder over et vilkårlig datum i et landskap. Den kan bestå av høyder samlet fra diskrete punkter eller fra gjennomsnittet av høyder innenfor et segment i landskapet. Denne definisjonen vil ligge til grunn for bruken av termen DHM i denne oppgaven.

Digitale høydedata blir gjerne organisert i tre forskjellige datastrukturer: Triangular irregular network(TIN), høydekoter eller regulære grid. Den siste formen er den mest vanlige kanskje først og fremst siden den er enklest å implementere i moderne datasystemer. Den største ulempen med data lagret i regulære grid, er at denne formen er statisk og skala-avhengig da størrelsen på cellene som bygger opp høydemodellen ikke kan forandres (Etzelmuller og Sulebak 2000). Dermed kan den ikke tilpasses den kontinuerlige jordoverflaten like godt som de dynamiske rektanglene i et TIN kan. Ved å øke antallet punkter i gridet oppnår man bedre potensiell nøyaktighet samtidig som man får en kraftig økning av redundant høydeinformasjon i slake partier. Eksplosjonen i lagringskapasitet og prosessorkraft i moderne datamaskiner sammen med stadig bedre komprimeringsrutiner har ført til at redundans ikke lenger utgjør et like stort problem i behandlingen av gridbaserte datasett.

Digitale høydemodeller er et subsett av Digitale terrengmodeller(DTM), som kan defineres som ordnede array av tall som representerer den romlige distribusjonen av attributter relatert til den topografiske overflaten (Moore et al. 1991). Disse attributtene betegnes også gjerne som topografiske parametre.

### 2.2.1 Topografiske parametre

Topografiske parametre er numeriske beskrivelser av de kontinuerlige topografiske formene landskapet består av. Moore et al. (1991) gir en fylldig oversikt over de viktigste av disse og deler dem inn i primærparametre og sammensatte- eller sekundærparametre. Primærparametre er parametre som blir kalkulert direkte fra en høydemodell. Blant disse er de to første ordens deriverte til en overflate; helning og aspekt. De to andre ordens deriverte er plan- og profil-kurvatur. Siden overflaten i en digital høydemodell ikke er kontinuerlig, men blitt diskretisert, er det vanlig å beregne disse parameterne

ved å differensiere innenfor enkle filtre eller ved å tilpasse en polynomoverflate til dataene innenfor filteret.

Sekundære parametere består av sammensetninger av primærattributter, og er indiser som beskriver eller karakteriserer den romlige variasjonen av spesifikke prosesser som oppstår i landskapet slik som distribusjonen av markvann eller potensialet for overflate-erosjon (Moore et al. 1991).

Siden DHM danner grunnlaget for beregningen av de topografiske parameterne, er det selvsagt at nøyaktigheten i høydemodellene har stor betydning for kvalitet på parameterne. Florinsky (1998) trekker frem to hovedfaktorer for nøyaktigheten på de beregnede terrengparameterne:

- Nøyaktigheten i høydemodellen som er grunnlaget for beregningene.
- Presisjonen i beregningsmetodene.

## Helning

Helning utgjør kanskje det viktigste aspektet ved topografisk form og er det mest benyttede topografiske attributtet. Helningsgradienten kontrollerer mengden av gravitasjonskraft som er tilgjengelig for geomorfologisk arbeid (Evans 1972), helningen styrer avrenning på og under overflaten, helningsgrid blir også benyttet til å korrigere satellittbilder for topografiske effekter på reflektansen.

Ifølge Evans (1980) terminologi defineres helning av et plan som tangerer overflaten, gitt av en høydemodell, i et vilkårlig punkt. Planet består av to komponenter; gradient og aspekt. Gradienten er den maksimale vinkelen mellom horisontalplanet og tangenten. Aspekt er kompassretningen til denne vinkelen. Burrough (1986) viser til at mange kun benytter 'helning' isteden for 'gradient' slik sistnevnte nettopp ble definert. Denne tolkningen vil også bli benyttet videre i denne teksten.

Den generelle formelen for beregning av helningsgradienten er gitt ved (Burrough 1986):

$$\tan S = \sqrt{\left(\frac{\delta z}{\delta x}\right)^2 + \left(\frac{\delta z}{\delta y}\right)^2} \quad (2.1)$$

$(\delta z/\delta x)$  og  $(\delta z/\delta y)$  er de beregnede gradientene i henholdsvis x og y retningen. Flere ulike forfattere har opp gjennom årene kommet med sine forslag til beregning av disse gradientene. Disse metodene skiller seg hovedsakelig fra hverandre ut fra hvor mange av nabopunktene innenfor filteret de tar hensyn til i beregningene. Florinsky (1998) lister opp metodene til Evans (1980), Zevenbergen og Thorne (1987), Moore et al. (1993) og Shary (1995) som

de viktigste, og gir en nærmere forklaring til hver metode. I et forsøk viser han at Evans sin metode, som tar hensyn til seks nabopunkter, gir de mest korrekte estimatene for helning og aspekt. På den annen side viser Burrough (1986) til undersøkelser som konkluderer med at metoder med både fire og åtte nabopunkter gir bedre resultater.

### Wetness indeks

Wetness indeksen er en indikator for den romlige distribusjonen av markvann og drenering (Beven og Kirby 1979). Formel 2.2 kvantifiserer topografiens effekt på denne distribusjonen:

$$W = \ln(A_s/\tan\alpha) \quad (2.2)$$

Her er  $A_s$  det spesifikke tilsigsområdet i  $m^2m^{-1}$  og  $\tan\alpha$  er helningsgradienten (i grader) (Moore et al. (1991), Wilson og Gallant (2000)).  $A_s$  integrerer effekten fra tilsigsområde og divergerende og konvergerende strømminger. Formelen forutsetter at transmissiviteten i jordlaget er uniform i hele tilsigsområdet og at mengden vann i systemet er konstant.

Denne formelen forutsier at celler lengre ned i tilsigsområdet, og særlig nær utløpene til hovedkanalene, er de våteste cellene i området, og at innholdet av markvann synker oppover langs strømningslinjene til grensen for tilsigsområdet (Wilson og Gallant 2000).

Med tilsigsområde menes arealet til området som drenerer ut fra hver celle.

### 2.2.2 Vurdering av kvalitet i digitale høydemodeller

I dette avsnittet vil en rekke prinsipper innenfor kvalitetsanalyse av digitale høydemodeller, med vekt på høydemodeller generert ut fra stereosatellittbilder, bli presentert.

I geodatastandarden fra Statens Kartverk (2001b) defineres kvalitet som helheten av egenskaper en enhet har og som vedrører dens evne til å tilfredsstille uttalte og underforståtte behov. Kvalitet består altså av flere elementer, men i denne oppgaven og for høydemodeller generelt er det stedfestningsnøyaktigheten som blir tillagt størst vekt.

Kvaliteten i en høydemodell kan måles i forhold til typen og størrelsen på feil eller avvik i modellen (Felicísimo 1994). Avviket kan defineres innenfor de ulike dimensjonene: x, y, z, horisontal, vertikal eller 3D.

Siden en stor del av applikasjonene der DHM benyttes gjerne dreier seg om topografisk form eller hydrologisk struktur, er det ikke tilstrekkelig å ha



kjennskap til høydemodellens absolutte nøyaktighet. Den relative nøyaktigheten er vel så viktig.

Relative feil, er der enkelte høydeverdier helt klart er feil i forhold til verdiene til piksler i nærheten. Relativ nøyaktighet, eller forholdet mellom nabopunkter, er lettest å observere i beregninger som benytter et lokalt vindu til genereringen av parametere (Giles og Franklin 1996). Beregninger med den første og, i enda større grad, andre deriverte slik som helning, aspekt og kurvatur, er svært følsomme for relative feil.

Absolutt nøyaktighet defineres i Statens Kartverk (2001b) som nøyaktighet i forhold til en definert geodetisk referanseramme. Beregning av differanser mellom målte punkter og beregnede punkter i en høydemodell gir et mål på den absolutte nøyaktigheten i modellen.

Verdiene i en høydemodell vil i varierende grad være påvirket av forskjellige former for feil og avvik. Disse deles gjerne inn i grove feil eller blundere, systematiske avvik, og standardavvik eller tilfeldige avvik. Skillet mellom hva som avvik og hva som er grov feil kan være vanskelig og definere. Innenfor tradisjonell fotogrammetri settes den gjerne som tre ganger toleransen til standardavviket. I høydemodeller generert ut fra stereo-satellittbilder vil grove feil oppstå i forbindelse med feilvurderinger fra operatørens side eller feil under stereokorrelasjonen. Særlig områder med skyer, vann, eller med generelt liten kontrast, samt kraftige høyde endringer(skygge effekter) eller høy tidsforskjell mellom opptak, er kjent for å kunne skape problemer for korrelasjonsalgoritmen. Blundere opptrer lokalt, og kan derfor være vanskelig å oppdage ved å sammenligne utvalgte punkter. Ofte kan kvalitative metoder være vel så effektive til å kontrollere og finne eventuelle blundere i en høydemodell.

Systematiske avvik oppstår som et resultat av produkter og prosedyrer benyttet under prosessen med å generere høydemodeller. Hvis det lykkes å identifisere noen av disse årsakene kan de systematiske avvikene reduseres. Vanlige årsaker til systematiske avvik i en høydemodell er horisontal forskyvning av modellen, at sensoren måler oppå vegetasjon og bebyggelse isteden for nede på bakken, eller generelt feil under oppsettet av stereo-modellen, årsakene kan være mange.

Standardavvik, eller tilfeldige feil, er et resultat av ukjente kombinasjoner av feil som er utenfor brukerens kontroll, disse feilene blir værende i høydemodellen etter at blundere og systematiske feil er blitt fjernet.

I en vurdering av en høydemodell er det vanlig at man forsøker å identifisere og kvantifisere disse avvikene.

### 2.2.3 Generering av høydemodeller basert på satellitt-bilder

Opp gjennom årene har satellittfjernanalyse utviklet seg til å bli et stadig viktigere supplement til flybilder og bakkeobservasjoner i å trekke ut høydeverdier fra terrenget. I takt med denne utviklingen har det også skjedd en utvikling innen fotogrammetrien i måten man behandler bilder og henter ut informasjonen på. Tidligere jobbet man med fysiske bilder i analytiske plottere. Digitale Fotogrammetriske Arbeidsstasjoner (DFA) har i de siste årene tatt over samtidig med den økte tilgangen til digitale bilder (Heipke 1995).

Stereo-opptak gjør det mulig å måle ulike høydeverdier. Ved å finne tilhørende punkter i to bilder i et stereopar og ved å kjenne til opptaksposisjonen og orienteringen av bildene, er det mulig å trekke ut 3D koordinater i objektetrommet.

Et sentralt tema i prosessen med å generere DHM er selve stereokorrelasjonen, eller matchingen, for å finne tilhørende punkter i et bildepar. Det finnes hovedsakelig to metoder for dette; område eller objekt basert.

Digitale høydemodeller vil innholde verdier som helt klart er enten for høye eller for lave. Disse feilene kan være et resultat av at de automatiske stereokorrelasjonsmetodene får problemer der det er lav kontrast i bildene, flertydighet i form av repeterende objekter eller periodiske mønstre (Felicísimo 1994).

### 2.2.4 Potensiell høydenøyaktighet til ASTER systemet

Nøyaktigheten i beregningen av absolutte høydeverdier under stereokorrelasjonen bestemmes ut fra kriteriene 1) B/H ratioen, 2) kvaliteten på korrelasjonsprosedyren og 3) nøyaktigheten til kontrollpunktene (Welch et al. 1998). Høydedifferanser eller relative høydeverdier til objekter kan beregnes ut fra denne enkle formelen (Welch 1989)(Se figur 2.2):

$$\Delta h \approx \Delta p / \tan \alpha \approx \Delta p / (B/H) \quad (2.3)$$

Her er  $\alpha$  vinkelen som oppstår i skjæringspunktet mellom opptakene fra det nadirpekende og det bakoverpekende teleskopet. Denne vinkelen gjør at ASTER opptakene får en 'base to height (B/H)' - ratio på 0.6. Parallaxe forskjellene ( $\Delta p$ ) blir beregnet under stereokorrelasjonen. Med en nøyaktighet under stereokorrelasjonen innenfor  $\pm 0.5$  til  $\pm 1.0$  piksel og B/H ratio på 0.6 kan man forvente at feilen for en enkelt relativ høydemåling av ASTER data vil ligge mellom  $\pm 12$  og  $\pm 25$  meter. Ved å benytte kontrollpunkter kan man transformere disse relative høydemålingene til absolutte høydeverdier

knyttet til et vertikalt datum. Da kommer hensynet til usikkerheten i kontrollpunktene nevnt i punkt tre ovenfor inn bildet. Lang og Welch (1999) viser at kontrollpunkter med RMSExyz omkring  $\pm 8$  meter, vil resultere i en høydemodell med RMSE<sub>x</sub>  $\pm 15$  meter, RMSE<sub>y</sub>  $\pm 11$  meter og RMSE<sub>z</sub> bedre enn  $\pm 48$  meter.

Eksempelet ovenfor forklarer den potensielle nøyaktigheten. I en reel situasjon vil flere faktorer være med å avgjøre kvaliteten i høydemodellen. I tillegg til nevnte faktorer tilføyer Sasowsky et al. (1992); kvaliteten på satellittbildene (f.eks. skydekke), terreng-relieff, og designen på algoritmen som benyttes.



## 3 Datasett

### 3.1 Testområde

For å se på innvirkningen fra ulike terrengtyper og vegetasjon, ble det valgt ASTER opptak fra to forskjellige områder av Norge. Ett som dekker store deler av Jostedalsbreen og området rundt ( $61^{\circ}59'N$ ,  $6^{\circ}07'E$ ), og et som dekker Oslo-området ( $59^{\circ}09'N$ ,  $10^{\circ}09'E$ ).

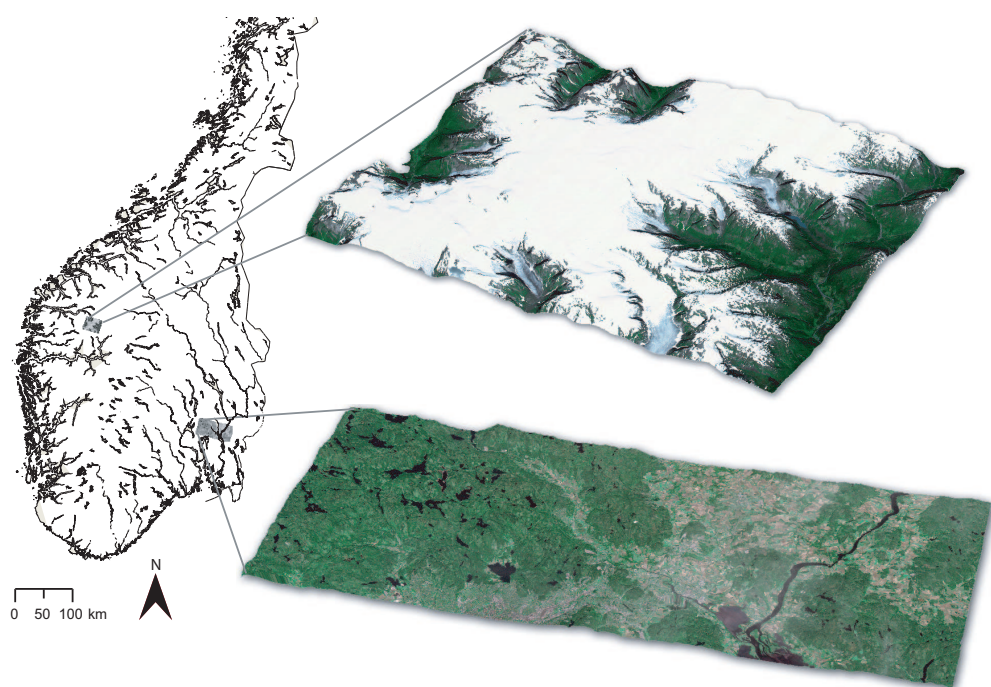
For å unngå skydekke, store vannområder og for at områdene ikke skulle bli for store og uhandterlige, ble det for hvert område valgt et utsnitt. Størrelsen på de to utsnittene var for Oslo-området og Jostedalsbreen på henholdsvis cirka  $1500 \text{ km}^2$  og  $567 \text{ km}^2$ . Figur 3.1 viser utsnittene og deres omtrentlige plasseringer.

#### 3.1.1 Oslo-området

Områdene rundt Oslo preges av rolige former. Vegetasjonen består for det meste av skog og dyrket mark eller bebyggelse i lavere mer sentrale deler. I tillegg er en del områder dekket av vann. Utvalgt statistikk for Oslo-området er oppgitt i figur 3.1.

Tabell 3.1: Utvalgt statistikk ifra studieområdene. Nedenfor er det trukket ut statistikk for noen enkle parametre til å beskrive områdene som dekkes av ASTER opptakene. Tallene for topografien er beregnet ut fra den topografiske høydemodellen, mens overflatedekket er hentet ifra klassifikasjonsresultatene.

| Topografi |         |                 |              | Overflatedekke(%) |         |      |
|-----------|---------|-----------------|--------------|-------------------|---------|------|
| Scene     | Relieff | Midlere helning | Maks helning | Vann              | Firn/Is | Skog |
| Oslo      | 678     | 6.7             | 54           | 4                 | 0       | 47   |
| Jost      | 1923    | 18.8            | 80           | 1                 | 65      | 8    |



Figur 3.1: Studieområdene. Kart over sørnorge som viser posisjonen til ASTER opp-takene. Utdragene viser en bildekompositt av ASTER VNIR båndene drapert over de genererte høydemodellene.

### 3.1.2 Jostedalsbreen

Foruten Oslo-området ble det valgt å generere en høydemodell fra et område dekket av sentrale deler av Jostedalsbreen og dalførene omkring.

Dette landskapet preges av relativt store høydeforskjeller nede fra bunnen av dalene og opp til platåbreen. Overflata inneholder hele spekteret fra frodig dalbunn til bart fjell, is og snø på toppene. Selve breen dekker over 60 prosent av scenen.

Kombinasjonen av bratte dalsider og en tilnærmet flatt snødekt slette, gjør dette landskapet til et spennende testområde. Området inneholder flere attributter som erfaringsmessig kan skape problemer for genereringen av høydemodellen generelt og korrelasjonen spesielt. Skyggeområdene og den jevne snødekte breoverflata vil gi noenlunde uniforme albedoverdier slik at det blir vanskelig å matche bildene.

## 3.2 Testmateriale

### 3.2.1 Referansem modell

Utsnitt fra Statens Kartverk sin landsdekkende digitale høydemodell ble benyttet som referansem modeller for de to Astermodellene.

Høydemodellen er generert ut fra TIN-modeller basert på kartverkets N50 kartdata. Gridstørrelsen er 25 meter, og standardavviket i høyde er rapportert til å være  $\pm 5$ -6 meter (Statens Kartverk 2001a).

For å kunne sammenlikne høydemodellene fra ASTER med referansem modellen, ble sistnevnte resamplet til 30 meters oppløsning med kubisk konvolusjon.

### 3.2.2 Kontrollpunkter

Kontrollpunktene til stereomodellen i PCI ble stort sett hentet ifra digitaliserte turkart 1:50000, men det forekom også at punkter ble hentet ifra økonomisk kartverk (ØK). Den horisontale stedfestningsnøyaktigheten for objekter i disse kartene er oppgitt til å være  $\pm 10$  meter for Kartverkets 1:50000 kart (Statens Kartverk 2003). Middelfeilen i ØK-kartene er oppgitt til å være  $\pm 2$  meter (Statens Kartverk 2002). Det ble oppgitt at noen av de scannede papirkartene kunne være relativt gamle utgivelser.

### 3.2.3 Markslagskart

Digitale markslagskart ifra NIJOS ble benyttet som treningsdata for klassifikasjonen av overflatedekke. Markslagskartene inneholder data om arealtilstand og arealkvalitet kartlagt for økonomisk kartverk (ØK).

### 3.2.4 ASTER opptak

ASTER opptakene ble bestilt ifra Earth Observing System Data Gateway (EDG) sine nettsider. Det ble valgt ut et bilde som dekker Området omkring Oslo og et annet over Jostedalsbreen. Bildene var fra henholdsvis 26. August 2000 og 28. Juli 2000. VNIR teleskopene var dreid henholdsvis  $0^\circ$  og  $8.5^\circ$  til siden på tvers av satellittbanen.



## 4 Metode

Flytskjemaet i figur 4.1 viser hovedlinjene i prosessen som blir beskrevet nærmere i dette metodekapittelet.

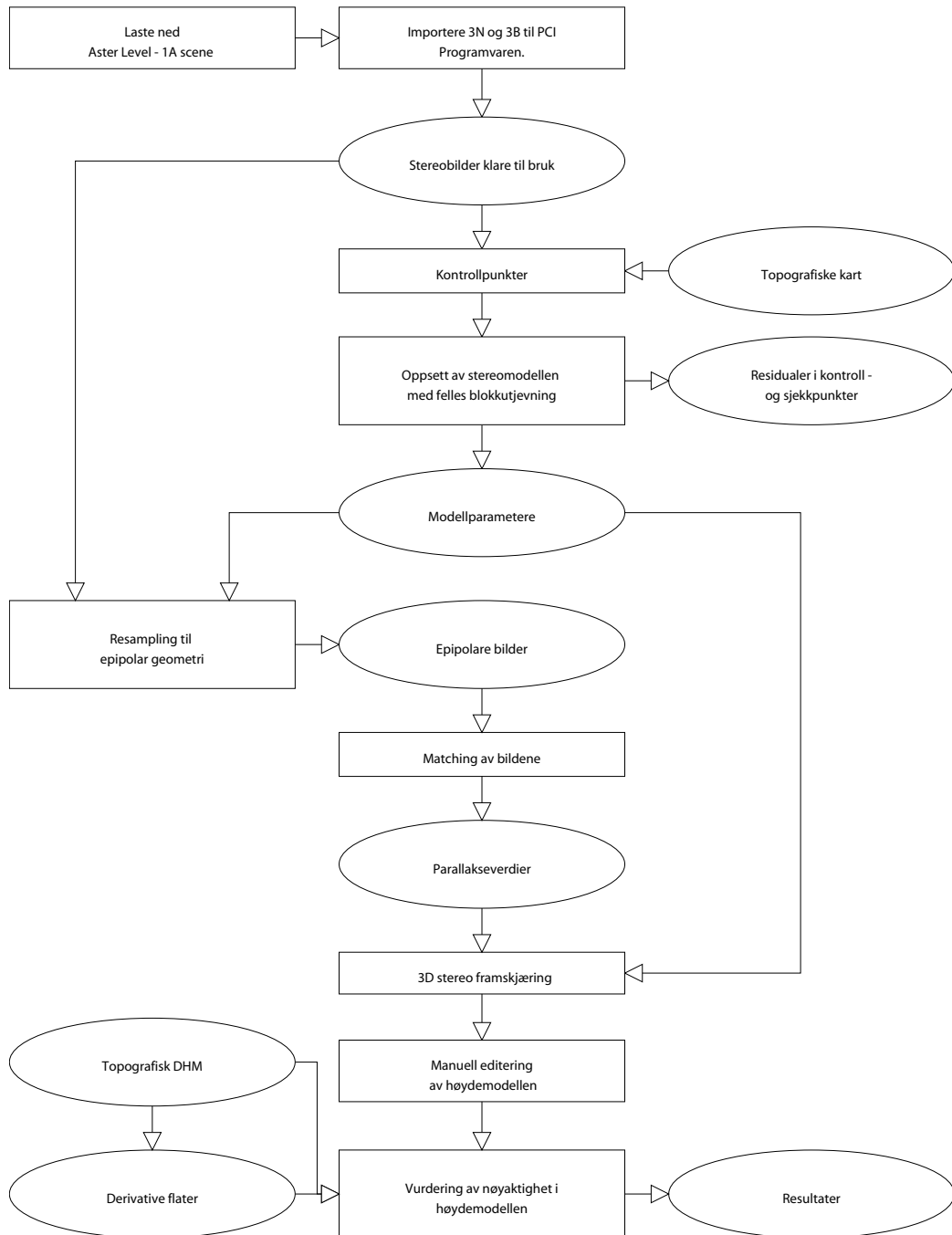
Proessen kan deles inn i tre hoveddeler: (1) Førprosessering av ASTER opptak; (2) Selve genereringen og editeringen av høydemodellene i PCI Orthoengine; (3) Tilslutt blir det gjort en vurdering av nøyaktigheten til høydemodellene.

Til denne oppgaven ble programpakken PCI Orthoengine© benyttet. Dette er den samme programpakken som USGS EROS Data Center (EDC) Distributed Active Archive Center (EDC DAAC) benytter til å produsere sitt standard DHM data produkt (Hirano et al. (2003), Lang og Welch (1999)). EDC DAAC er blant annet ansvarlig for prosessering og distribuering av ASTER data.

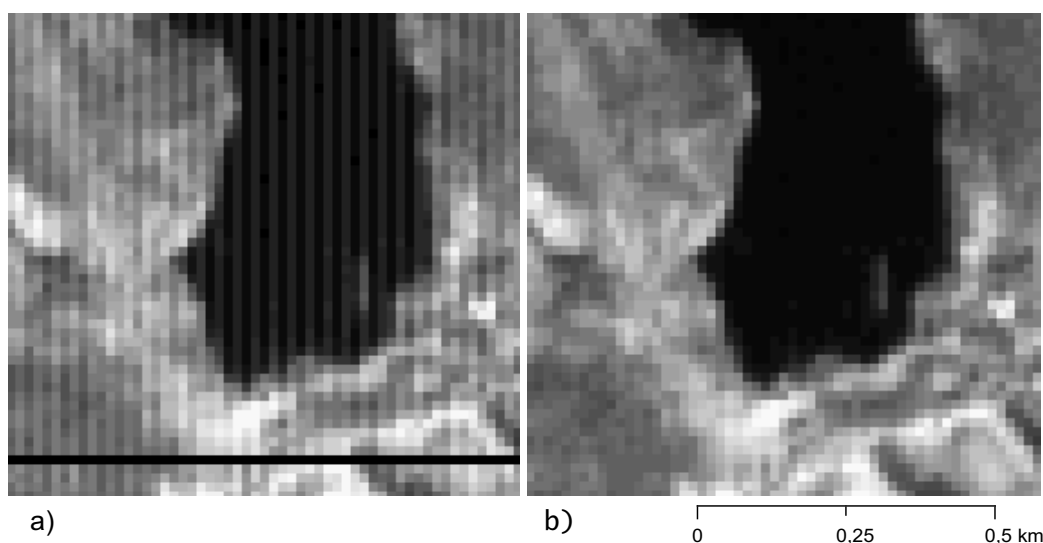
Orthoengine er ei programpakke som blant annet inneholder et sett med metoder for å importere satellittbilder og automatisk generere høydemodeller ut fra disse. Ved hjelp av høydemodellen og originalbildene kan man videre generere orthobilder.

Det finnes flere andre aktører med liknende produkter på markedet. Blant de meste kjente av disse er ERDAS Imagine OrthoBASE Pro<sup>TM</sup> (ERDAS) og Desktop Mapping System (DMS)<sup>TM</sup>.

PCI ble valgt fordi det virket som de fleste aktørene som jobbet med ASTER benyttet seg av denne programvaren. AlRousan og Petrie (1998) har sammenliknet resultater fra automatisk generering av høydemodeller med PCI, ERDAS og DMS der PCI sin programvare kom marginalt best ut. Riktignok ble produktene testet på bilder ifra SPOT i tillegg til at produsentene har videreutviklet programvaren siden dette. Cuartero et al. (2004) har sammenliknet høydemodeller fra Orthoengine og Orthobase og funnet ut at høydemodellene fra Orthoengine hadde lavere RMSE verdi men inneholdt flere grove feil enn modellene generert med Orthobase. Generelt viser disse forsøkene at PCI Orthoengine er et produkt fullt på høyde med de andre på markedet.



Figur 4.1: Flytdiagram for metoden. Skjemaet viser hovedlinjene i prosessen med å generere, editere og evaluere terrengmodeller ut fra ASTER opptak.



Figur 4.2: Kalibrering av radiansverdier. To utsnitt a) og b) fra Oslo-området. Der a) innholder et tydelig vertikalt mønster av striper, og b) viser det samme utsnittet etter kalibreringen av radiansverdiene. Den sorte horisontale linjen nederst i utsnitt a) er en såkalt line-drop".

## 4.1 Førprosessering

ASTER scener blir distribuert i HDF-EOS formatet. De fleste programvarepakkene for behandling av satellittbilder innholder egne moduler for å importere bilder på dette formatet.

Som nevnt er ASTER L1A data målte irradiansverdier ved sensoren uten at de radiometriske og geometriske korreksjonskoeffisientene er lagt til. Bilde a) i figur 4.2 viser at disse datasettene inneholder et mønster av vertikale striper som tydelig ikke gjenspeiler den naturlige vegetasjonen. Stripene er et resultat av ulik følsomhet mellom detektorene i skanneren. Toutin (2002) hevder at destriping av bildene er svært viktig for matchingen og dermed for kvaliteten på terrengmodellen. I et forsøk viser han at nøyaktigheten i en høydemodell forbedres med nesten 10 prosent.

Importfunksjonen i Orthoengine benytter de radiometriske koeffisientene til å gjøre om fra DN verdier til kalibrerte irradiansverdier.

I tillegg til vertikale striper inneholdt to av bildene linjer uten data, eller line-drop". Disse ble korrigert med middeltallet fra pikslene i nabolinjene.

Siden det senere skulle gjøres en klassifikasjon av overflatedekket var det nødvendig å kalibrere bildene i de resterende båndene også. Dette ble gjort for begge områdene, slik at til sammen 26 bilder skulle kalibreres. Importfunksjonen i Orthoengine, beskrevet ovenfor, kalibrerer kun VNIR båndene.

Derfor ble det valgt å benytte en modul i ENVI 4.0(programvare for bildebehandling/fjernanalyse), som kalibrerer alle båndene med koeffisientene ifra HDF-fila. Da dette ble utført viste det seg at stripene i bildene ikke forsvant men snarere ble forsterket. Etter å ha studert dataene nøye, kunne det virke som at koeffisientene i den radiometriske korreksjonstabellen var forskjøvet. Dette gjaldt kun for SWIR båndene. Uten å finne noen forklaring til årsaken ble det bestemt å endre på tabellene ved forskyve alle koeffisientene med ett steg. Visuell inspeksjon av resultatet etter kalibreringen viste klar forbedring slik at disse bildene ble benyttet videre.

## 4.2 Generering av ASTER DHM i PCI Orthoengine

PCI Orthoengine tilbyr programvare for automatisk generering av høydemodeller ut fra stereosatellittbilder.

Prosessen med å generere en høydemodell kan grovt deles inn i følgende steg:

1. Oppsett av stereomodellen;
2. Matching av bildene for å kunne knytte sammen tilhørende punkter og beregne parallaxe;
3. 3D stereo framskjæring;
4. Editering av DHM.

Punkt 2 og 3 foregår helt automatisk, mens punkt 1 og 4 krever en del manuelt arbeid.

### 4.2.1 Oppsett av stereomodellen

For å kunne oversette parallaxe og bildekoordinater til kartkoordinater må opptaksgeometrien gjenskapes så nøyaktig som mulig. For å få til dette har PCI programvaren implementert en matematisk modell utviklet av Toutin ved CCRS (Toutin 2001), (AlRousan et al. 1997).

Dette er en parametrisk modell som tar hensyn til hele den fysiske opptaksgeometrien.

Modellen baserer seg på bruk av kollinearitets likningene som bygger på prinsippet om kollinearitet fra tradisjonell fotogrammetri. Dette sier at et objektpunkt, dets avbildning og perspektivsenteret, alle skal ligge langs en

rett linje (Wolf 1974). Likningene har blitt videreutviklet og tilpasset slik at de kan benyttes på linjeprojisert data. I tillegg skal de kunne rette opp forstyrrelser på grunn av plattformens, sensorens, og jordas bevegelser under opptaket samt den kartografiske projeksjonen. Modellen avhenger derfor av tilgang til ephemeris data og attitude data som følger med i hdf-fila sammen med ASTER dataene.

Det blir for omfattende å forklare alle parameterne i detalj i en hovedoppgave som dette. Her er bare tatt med den generelle formen på de tilpassede kollinearitets likningene og en kort forklaring av parameterne (AlRousan et al. 1997):

$$P_p + y(1 + \delta\gamma \cdot X) - \tau H - H_0 \cdot \Delta T^* = 0 \quad (4.1)$$

$$X + \theta \frac{H}{\cos \chi} + \alpha q \left( Q + \theta x - \frac{H}{\cos \chi} \right) - Q \cdot \Delta R = 0 \quad (4.2)$$

Her er

$$X = (x - ay) \left( 1 + \frac{h}{N_0} \right) + by^2 + cxy \quad (4.3)$$

og

$$H = h - \frac{x^2}{2N_0} \quad (4.4)$$

Hver parameter er gitt av en matematisk formel som representerer den fysiske virkeligheten til opptaksgeometrien, inkludert satellitten, Jorda og kartprojeksjonen. Disse parameterne er:

|                            |   |
|----------------------------|---|
| $P$ og $Q$                 | er skalafaktorer i henholdsvis $X$ og $Y$ ;   |
| $\theta$ og $\tau$         | er funksjoner av utjevningvinklene i henholdsvis $X$ og $Y$ ;   |
| $a$                        | er en funksjon av jordas rotasjon;  |
| $H_0$                      | er satellittens høyde ved senterlinja;  |
| $N_0$                      | er normalen til ellipsoiden;  |
| $\chi, \delta\gamma, bogc$ | er de kjente annen ordens parameterne som er en funksjon av geometrien mellom satellittens, scenens og jordas senter; |
| $\Delta T^*$ og $\Delta R$ | er de ikke-lineære variasjonene i satellittens oppførsel;   |
| $p$ og $q$                 | er bildekoordinatene; og  |
| $x, y$ og $h$              | er kartkoordinatene i et gitt datum.  |

Selve løsningen av de ukjente parameterne i kollinearitetslikningene blir utført ved felles blokk utjevning. Dette skjer først etter at man har lagt inn pass og kontrollpunkter. Fire kontrollpunkter er det som behøves for at

modellen skal kunne beregne de ukjente. Ved å legge inn flere kontrollpunkter enn nødvendig oppstår redundans og parameterne blir tilnærmet ved minste kvadraters metode.

Etter å ha valgt riktig modell (det finnes en modell for hvert sensor), ble det valgt ut kontrollpunkter. Det er mulig å generere terrengmodeller fra ASTER uten kontrollpunkter, men det støttes ikke av Orthoengine. Dessuten er nøyaktigheten i slike langt lavere.

Det ble lagt vekt på å finne lett gjenkjennelige punkter som var godt distribuert både i flate og høyde. Vegkryss, svingninger i elveløp og spisse odder ble oftest benyttet. I bildene ifra Jostedalsbreen var det vanskelig å finne lett gjenkjennelige punkter oppe på breen og i de største helningene, slik at antallet punkter nok ble noe skjevt fordelt i høyde.

Kontrollpunktene ble gitt i UTM koordinater med WGS 84 som datum. Høydene som ble gitt, var i forhold til geoiden, eller den midlere vannstanden.

I alt ble det samlet inn 27 og 38 kontrollpunkter fra henholdsvis Oslo-området og Jostedalsbreen. Av disse ble 13 og 19 punkter gjort om til uavhengige sjekkpunkter. Disse punktene var dermed ikke med i beregningen av parametere, men ble holdt tilbake for å teste nøyaktigheten i oppsettet.

Det ble ikke gjort forsøk med å variere mengden av kontrollpunkter for å se på hvordan residualene i sjekkpunktene forandret seg. Tidligere studier har vist at minkingen i residualene i sjekkpunktene raskt flater ut for hvert overflødige kontrollpunkt som legges til (AlRousan et al. 1997).

Resultatet etter blokkutjevningen er et sett parametere som beskriver overgangen fra bildekoordinater til kartkoordinater i et gitt koordinatsystem.

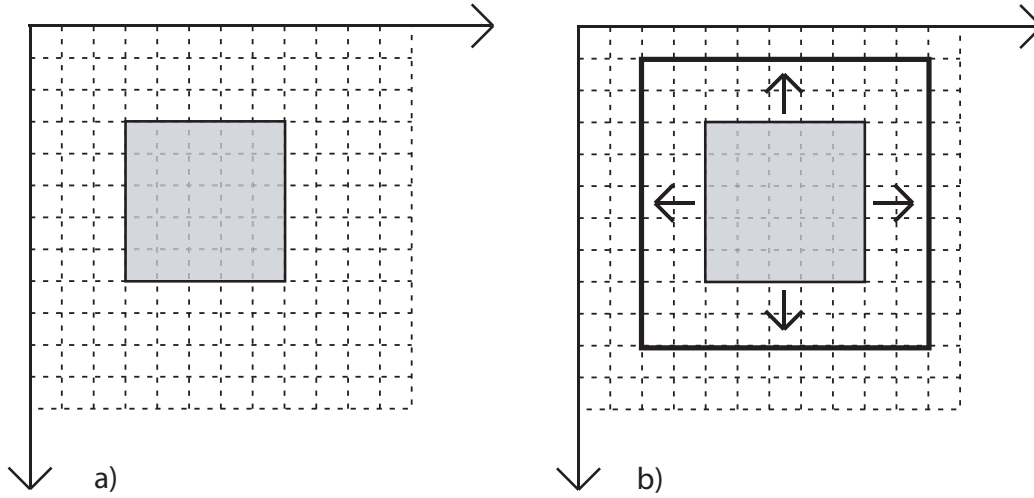
### 4.2.2 Stereokorrelasjon

Etter at stereomodellen er klar, er det mulig å trekke ut høyder i terrenget ved hjelp av stereokorrelasjon eller matching. Matching av digitale bilder kan defineres som en automatisk metode for å finne tilhørende objekter fra to eller flere bilder som helt eller delvis dekker samme scene. Objektet kan være et punkt eller en form.

Metoden som er implementert i Orthoengine er en såkalt områdebasert matching, eller gråtonematching. Ikke formbasert matching.

For begrense det aktuelle søkeområdet til en linje, ble bildene resamplet til epipolar geometri. I tillegg ble minimum og maksimum høyde i terrenget angitt for å begrense søkeområdet på linja.

Resampling til epipolar geometri innebærer å minimere forskyvning av tilhørende objekter på tvers a satellittens bane. Derfor kan all forskyvning mellom objekter i de to bildene tilskrives relativ høydeforskjell.



Figur 4.3: Matchingen. Prinsippene for matchingen. a) Referansevinduet. b) Referansevinduet forflyttet innenfor søkevinduet.

Matchverdiene beregnes i Orthoengine med normalisert krysskorrelasjon. For å beregne krysskorrelasjonen mellom to vinduer, blir referansevinduet forflyttet piksel for piksel innenfor et noe større søkevindu slik som på figur 4.3. I hver posisjon blir den normaliserte krysskorrelasjon-koeffisienten mellom referansevinduet og den tilhørende delen av søkevinduet beregnet som i formelen nedenfor (Gonzalez og Woods 1992).

$$\eta(x, y) = \frac{\Sigma_i \Sigma_j [h(i, j) - \bar{h}][f(x + i, y + j) - \bar{f}]}{\sqrt{\Sigma_i \Sigma_j [f(x + i, y + j) - \bar{f}]^2} \sqrt{\Sigma_i \Sigma_j [h(i, j) - \bar{h}]^2}} \quad (4.5)$$

Her er  $h(i, j)$  og  $f(x + i, y + j)$  de individuelle gråtonene i henholdsvis referansevinduet og det tilhørende delen av søkevinduet.  $\bar{h}$  og  $\bar{f}$  er midlere gråtoneverdier i referansevinduet og tilhørende del av søkevinduet.  $i$  og  $j$  er antall rader og kolonner i referansevinduet. For at korrelasjonen skal være uavhengig av forskjeller i intensitet og kontrast blir  $\eta(x, y)$  normalisert til å ligge mellom  $[-1, 1]$ .

Maksimumsverdien  $\eta(x, y)_{Maks}$  av de beregnede koeffisientene definerer posisjonen, i heltall, til beste match mellom vinduene.

For å bestemme punktet på subpikselnivå blir en overflate tilnærmet funksjonen  $\eta(x, y)$  omkring  $\eta(x, y)_{Maks}$ , med en annen ordens polynomial. Deretter bestemmes denne flatens maksimum.

Avstanden mellom de to punktene blir tatt for å være parallaksen som bestemmer den relative høyden til punktet.

Matchingen blir gjentatt på forskjellige nivåer fra grov oppløsning til fine-

re. Resultatet fra matchingen i ett nivå bestemmer omtrent hvor riktig match befinner seg i det neste nivået. Det er mulig å velge å avbryte matchingen før den kommer til det fineste nivået. Dette kan gjøres hvis man ønsker en rask test på om oppsettet er riktig, eller for å unngå å ta med uønskede objekter som ikke har noe med terrenget å gjøre. Det siste kan forekomme i satellittbilder med høy oppløsning.

Siden ASTER leverer bilder med medium oppløsning ble detaljnivået satt til høyt. Noe som innebærer at matchingen går ned til det fineste nivået.

Det ble valgt å generere høydemodeller med 30 meters oppløsning. Dette ble gjort på bakgrunn av forventet RMSEXY og praktiske årsaker. 30 meters oppløsning krever kun at ett av fire 15-meters ASTER piksler oppnår matching for å få en full høydemodell (25 % eller høyere suksessrate) (Lang og Welch 1999).

Tidligere undersøkelser viser at det er mulig å oppnå en nøyaktighet på mellom  $\pm 0,5$  og  $\pm 1$  piksel under selve matchingen (Toutin 2002), (Welch et al. 1998).

Etter matchingen genererer PCI et bilde i epipolar projeksjon der pikselverdiene er representert ved korrelasjonskoeffisientene til punktet. For Oslo-området ble det oppnådd match i 99 prosent av pikslene. For Jostedalsbreen var tallet noe lavere, 97 prosent.

### 4.2.3 3D stereo framskjæring

Etter matchingen bestemmes de kartografiske koordinatene (plan og høyde) for hvert punkt i det valgte systemet. Dette skjer ved en minste kvadraters framskjæringsmetode som benytter seg av den geometriske modellens likninger og beregnede parametere.

Etter at høydeverdiene var bestemt ble det utført manuell editering av høydemodellen mens den fortsatt var i epipolar projeksjon. Først etter editeringen ble modellen projisert til WGS 84 datumet.

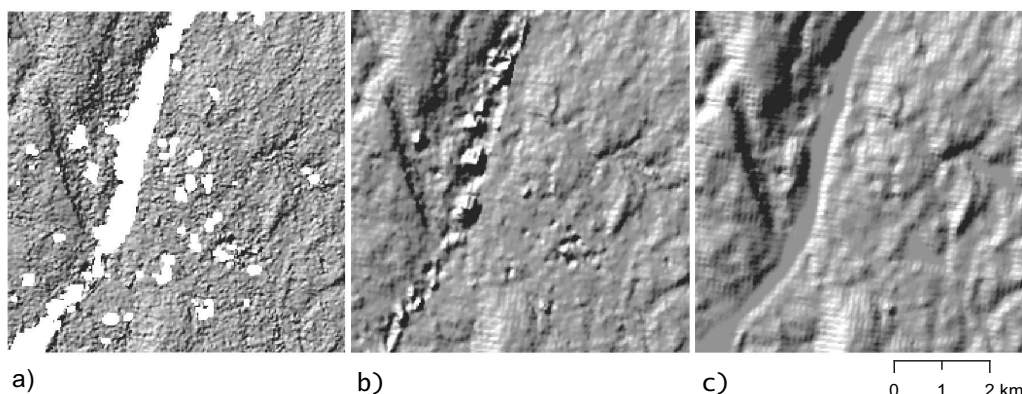
### 4.2.4 Editering av høydemodellen

Uansett hvilke metoder som benyttes vil det alltid være nødvendig å editere høydemodellen etter matchingen.

Feil under matchingen resulterte i grove feil samt systematisk støy i høydemodellen. De vanligste årsakene til dette var områder med lav kontrast, slik som vannflater og skyggeområder, eller flertydighet i form av mønstre som gjentok seg. Skyer på bildene førte også naturligvis til feilmatching.

Der hvor korrelasjonen feilet oppsto 'hull' i høydemodellen der den ble tilegnet en feilverdi. Orthoengine inneholdt en opsjon for å automatisk tette





Figur 4.4: Editering av høydemodell. Utsnitt fra DHM1, DHM2 og DHM3 i henholdsvis a), b) og c). En del av Glomma synes på bildene.

disse hullene etter genereringen av høydemodellen. Det ble da estimert verdier for punktene ved hjelp av lineær interpolasjon. Etterpå ble høydemodellen glattet med et  $3 \times 3$  Gaussfilter.

Denne metoden viste seg å fungere tilfredsstillende der det kun var små områder med punkter som skulle estimeres. Der hvor det var store sammenhengende områder som måtte interpoleres skapte den ofte et mønster av høye sirkelformede topper og dype hull. Dette kom særlig tydelig frem i områder med vann og skyer. Bilde b) i 4.4 viser et skyggemodell over en strekning av Glomma der dette mønsteret tydelig fremkommer. En opsjon i programvaren der det var mulig å maskere ut områder, der en forventer feilmatching, ville hindret dette.

Det ble derfor besluttet å generere tre modeller fra hvert område for å teste ulike editeringsmetoder mot hverandre.

En modell(DHM1) ble generert uten å interpolere der hvor korrelasjonen hadde feilet. Det ble heller ikke gjort noen form for manuell editering på denne modellen.

I den andre modellen(DHM2) ble de automatiske metodene benyttet uten manuell editering tilslutt.

Den tredje modellen(DHM3) er lik den andre, men med manuell editering tilslutt. Figur 4.4 viser et utsnitt fra hver av disse modellene i henholdsvis bilde a, b og c.

Resten av dette kapittelet beskriver fremgangsmåten som ble benyttet for å generere (DHM3).

Det er i de senere årene blitt forsket mye på metoder for å oppdage og rette opp avvik i digitale høydemodeller( Felicísimo (1994), Hannah (1981)). Isteden for å forsøke å implementere disse metodene, ble det fokusert på å

teste ut orthoengines egne innebygde verktøy. Disse består blant annet av en interpolasjonsmetode (invers avstands vekting), et filter for fjerning av usannsynlige verdier (støy fjerning) og glatting av modellen ( $3 \times 3$  gauss-filter).

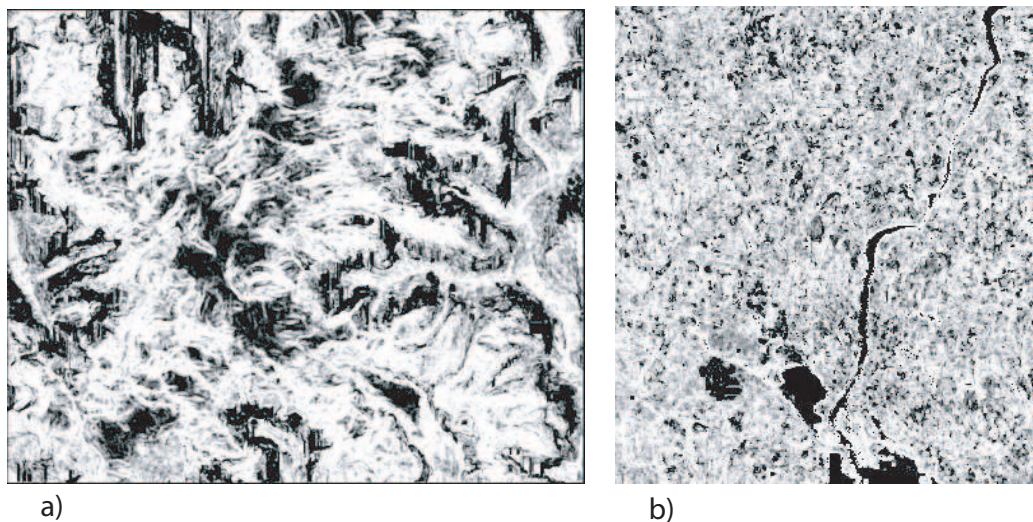
Det første som ble gjort var å erstatte pikselverdier hvor korrelasjonen hadde feilet med tilnærmet riktige høydeverdier. Ettersom det viste seg at piksler som umiddelbart grenset til slike områder ofte kunne være gjenstand for store feil, ble disse først fjernet. Deretter ble det estimert nye høydeverdier ved interpolasjon mellom omkringliggende piksler. Der hvor det var store sammenhengende områder med feil ble det ikke forsøkt å interpolere. Disse ble kun satt til en bakgrunnsverdi(nodata).

Etter at hullene i modellen var tettet eller satt til nodata, ble alle grove feil forsøkt identifisert, fjernet og erstattet ved interpolasjon. De største avvikene ble funnet ved å studere modellen visuelt. Dette var en meget tidkrevende prosess der det var vanskelig å vurdere hvor nøye man skulle gå til verks. Det viste seg at de fleste steder med grove feil sammenfalt med steder der korrelasjonen hadde feilet og Orthoengine hadde forsøkt å interpolere. En grei metode for raskere og enklere å kunne lokalisere disse feltene var å legge over masker dannet ved å terskle bildene med korrelasjonskoeffisienter(fig. 4.5).

Etter å ha gått igjennom hele modellen visuelt og rettet opp feil ble den innebygde metoden for støyfjerning benyttet. Denne består av to separate filtre der det ene først kalkulerer gjennomsnitt og varians av de åtte pikslene som omgir hvert piksel. Hvis verdien i senterpikselet er mer enn to standardavvik unna gjennomsnittet blir denne satt til å være feil. Det andre filteret teller opp antall feilpiksler rundt hvert piksel. Hvis det er over en viss grense blir også dette pikselet satt til å være feil. Tilslutt ble det igjen estimert nye høydeverdier ved interpolasjon.

Vannområders uniforme reflektans førte som kjent til feil under stereokorrelasjonen som igjen forplanter seg til feil i høydemodellen (bilde a) og b) i figur 4.4). For å rette opp disse feilene ble generert en vannmaske fra hvert område. Siden vannets reflektans er så forskjellig fra andre overflatematerialers, særlig i det nærinfrarøde, ble masken generert kun ved å terskle bildet fra dette båndet(3N). Denne masken ble deretter lagt over høydemodellen slik at høydeverdiene under masken kunne bli satt til riktig verdi. I tillegg til å endre verdiene under selve masken ble også en del av verdiene i nabopikslene fjernet, da disse også inneholdt tydelige avvik. For de største vannene ble høydene hentet ifra topografiske kart. Mens for småvannene ble høyden satt til å være gjennomsnittet av verdiene i nabopikslene rundt.

Høydemodeller generert ut fra satellittbilder inneholder ofte et systematisk mønster av små hull og forhøyninger i terrenget (Giles og Franklin 1996). For



Figur 4.5: Korrelasjonskoeffisientene. a) Viser hele området ifra Jostedalsbreen. Sort betyr at det ikke ble funnet noen match. Disse områdene finnes for det meste i bratt fjellskrånninger og oppe på breen. Merk at mønsteret koeffisientene danner, ikke er tilfeldig men følger topografien. b) Utsnitt fra Oslo-området. De sorte områdene er for det meste områder dekket av vann (Glomma og Øyeren). Det sorte feltet Sørvest i bildet er et resultat av en liten sky. Mønsteret som koeffisientene danner er her, i motsetning til Jostedalsbreen, relativt tilfeldig.

å fjerne dette mønsteret ble hele modellen glattet med et  $3 \times 3$  Gaussfilter tre ganger. Dette filteret fjerner mye av støyen i modellen samtidig som den også kan fjerne detaljer som gjenspeiler det virkelige terrenget.

All manuell editering i modellen ble gjort mens modellen fortsatt var i epipolar projeksjon etter matchingen. Dette er vanlig prosedyre slik at man kan veksle mellom høydemodellen og det ene epipolare bildet mens man editerer. Først etter editeringen ble modellen projisert til WGS 84 datumet.

Den prosessen kalles for geokoding i PCI. Ved hjelp av likningene og parameterne som beskriver transformasjonen fra kartkoordinater til bildekoordinater, blir høydeverdien for hvert punkt i outputbildet bestemt ut fra en midling av verdiene innenfor et vindu omkring det tilhørende punktet i inputbildet.

PCI benytter en nærmeste nabo resamplingsmetode. Egenskapene til denne metoden er at den er svært enkel og rask men kan introdusere et mønster i outputbildene. Etter geokodingen inneholdt da også høydemodellene et regulært mønster av linjer som tydelig kunne sees på skyggemodeller. Nærmere undersøkelse viste at linjene hadde form av små rygger i terrenget. De gjentok seg med fem piksels mellomrom og kunne være opptil 7 meter høye. Ryggene kom tydeligst frem i bratte helninger i terrenget. De oppstår på

en eller annen måte under interpolasjonen under geokodingen. Modellen ble derfor filtrert med et  $5 \times 5$  median filter som så ut til å fjerne det meste av disse ryggene.

### 4.3 Kvalitetsvurdering

En rekke forskjellige kvantitative og kvalitative metoder ble valgt ut og benyttet til å vurdere kvaliteten i høydemodellene. Hva som menes med ordet kvalitet i denne sammenhengen står generelt beskrevet i teoridelen, kapittel 2.2.2.

For å kunne vurdere kvaliteten måtte det genereres flere datasett i tillegg til de rene høydemodellene. De viktigste av disse er beskrevet i underkapitlene nedenfor.

Høydemodellen ifra kartverket ble benyttet som referansemodell(REFDHM) der dennes høydeverdier ble antatt å være den sanne høyden til jordoverflaten. Avvikene mellom ASTER DHM'ene og REFDM ble beregnet for hvert punkt og lagret i differansemodeller, som grunnlag for de kvantitative metodene. Alle oppgavene og beregningene som beskrives i dette kapittelet, med unntak av klassifikasjonen, ble i hovedsak utført i ESRI's Arcgis 8.3 programvare. Til klassifikasjonen ble ENVI 4.0 benyttet.

Nedenfor følger en kort punktvis oversikt over hvilke metoder som ble benyttet innenfor de respektive delene av resultatkapittelet. Metodene var stort sett de samme for begge områdene.

**Oppsettet av stereomodellen** Data som viser den absolutte og relative nøyaktigheten til selve oppsettet av stereomodellen presentert i form av RMSE-verdier. Dette er kun utskriften som PCI genererer etter blokk-utjevningen.

**Høydemodellene** De ulike høydemodellene ble sammenliknet ved hjelp av enkel deskriptiv statistikk og visualisering, for å finne ut i hvilken grad editeringen påvirket modellene. Høydemodellen som inneholdt mest editering og som derfor ble regnet som den endelige modellen, ble benyttet videre i analysen.

Den romlige fordelingen av avvikene i modellene ble visualisert ved at differansemodellene ble delt i tre klasser og fargekodet. De to grenseverdiene som skilte klassene fra hverandre ble satt til å ligge  $\pm$  ett standardavvik omkring 0-avviket for datasettet fra Oslo-området og  $\pm$  15 meter for Jostedalsbreen.

Høydeverdiene i ASTER modellen og referansemodellen ble sammenliknet langs utvalgte profiler ifra områdene.

Det ble generert koter og skyggemodeller som siden ble benyttet i en visuell sammenlikning.

**Vurdering av avvik innenfor ulik topografi og markslag** I de neste punktene ble det foretatt en kvantitativ vurdering av hvilken effekt parametrene som helningsgradient, aspekt og markslag hadde på avvikene i høydemodellen.

Det ble for hvert område generert aspekt- og helningsgrid ifra de topografiske høydemodellene. Disse ble delt inn i klasser som igjen gav de ulike sonene hvorfra statistikk ble beregnet. Resultatene ble presentert ved stolpediagrammer som viser middelveien og RMSE-verdien innenfor hver av klassene i de ulike datasettene.

**Beregning av topografiske parametre** Feil i høydemodellen vil forplan- te seg til de topografiske parametrene. En kvalitativ sammelikning av parametrene generert ifra ASTER modellen og referansemodellen ble utført for å vurdere den relative nøyaktigheten i ASTER modellen.

### 4.3.1 Differansemodellene

En differansemodell gir et komplett bilde av nøyaktigheten til en høyde- modell. Det er en kontinuerlig flate av målte høydedifferanser mellom en referansemodell( $Z_i$ ) og modellen( $Z_j$ ) man ønsker å vurdere nøyaktigheten av.

$$\Delta Z = Z_i - Z_j \quad (4.6)$$

Differanseflaten kan enten analyseres statistisk eller visualiseres. Ved å visualisere den kontinuerlige differanseflaten er det mulig å avdekke den romlige fordelingen av avvik, og det blir enkelt å finne grove feil i modellen.

Denne metoden vil selvfølgelig være svært følsom for avvik i selve referansemodellen, samt horisontale avvik mellom samme objekt i de to høyde- modellene som danner grunnlaget for differansemodellen. Betydningen av de horisontale eller planimetriske avvikene varierer med helning og aspekt. Hvis det planimetriske avviket er størst i helningsretningen vil effekten av dette følge formelen:

$$\Delta z = \Delta x \cdot \tan(\alpha)$$

I denne oppgaven ble det generert differansemodeller mellom hver ASTER DHM og den tilhørende delen av referansemodellen (REFDHM). Verdiene i disse differansemodellene ble tolket som avvik mellom ASTER DHM og denne sanne høyden på jordoverflaten.

Siden ASTER DHM ble generert med 30 meters oppløsning mens cellestørrelsen i REFDM var 25 meter, ble sistnevnte resamplet med kubisk konvolusjon i Arcgis til 30 meter. Deretter ble det for hver ASTERDHM klippet ut en nøyaktig tilsvarende del av REFDM slik at differansebildene enkelt kunne genereres ved å trekke ASTERDHM fra REFDM.

Negative verdier i differansemodellen betyr altså at ASTER DHM ligger høyere enn den sanne overflata, her representert ved referansemodellen.

Det ble generert differansemodeller for alle modellene DHM1, DHM2 og DHM3. Disse ble sammenliknet ved hjelp av enkel deskriptiv statistikk og visuelt for å finne ut i hvilken grad editeringen hadde innvirkning på resultatet.

## RMSE

Innen fotogrammetrien brukes ofte Root mean squared error (RMSE) for å beskrive nøyaktigheten i et kartdatasett enten i plan (XY) eller høyde (Z).

RMSE blir definert som kvadratrot av gjennomsnittet av de kvadrerte avvikene. Avvikene det her er snakk om kan være avstanden, i høyde, mellom ett punkt i en terrengmodell og det samme punktet med høyde fra en DGPS-måling. DGPS-målingen blir brukt som den 'sanne' høyden i punktet og avviket sier noe hvor godt terrengmodellen er tilpasset virkeligheten. Formelen for RMSE i høyderetningen kan skrives slik:

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{(z_{map} - z_{check})^2}{n}} \quad (4.7)$$

RMSE-verdien gir en globalt mål på avvikene i en høydemodell, den forteller ingenting om den romlige distribusjonen av avvikene innenfor modellen. Den forteller heller ikke noe om det midlere avviket mellom referanseverdiene og de estimerte. Derfor vil rapportering RMSE-verdien alene ikke kunne gi et godt nok bilde av nøyaktigheten i en høydemodell.

### 4.3.2 Beregning av helning og aspekt

Arc/Info sine innebygde algoritmer ble benyttet for å beregne helning og aspekt. Metoden benytter seg av et  $3 \times 3$  vindu som forflyttes fra punkt til punkt i hele høydemodellen. For hvert punkt beregnes x- og y-gradienten ved de partiell deriverte gitt nedenfor (Burrough 1986):

$$[\delta z/\delta x] = [(z_{i+1,j+1} + 2z_{i+1,j} + z_{i+1,j-1}) - (z_{i-1,j+1} + 2z_{i-1,j} + z_{i-1,j-1})]/8\delta x \quad (4.8)$$

$$[\delta z/\delta y] = [(z_{i+1,j+1} + 2z_{i,j+1} + z_{i-1,j+1}) - (z_{i+1,j-1} + 2z_{i,j-1} + z_{i-1,j-1})]/8\delta y \quad (4.9)$$

De partiell deriverte benyttes deretter i formel 2.1 på side 9 for å beregne helningen. Formelen for aspekt er gitt nedenfor (Burrough 1986):

$$\tan A = -(\delta z/\delta y)/(\delta z/\delta x) \quad (4.10)$$

### 4.3.3 Topografisk Wetness Index

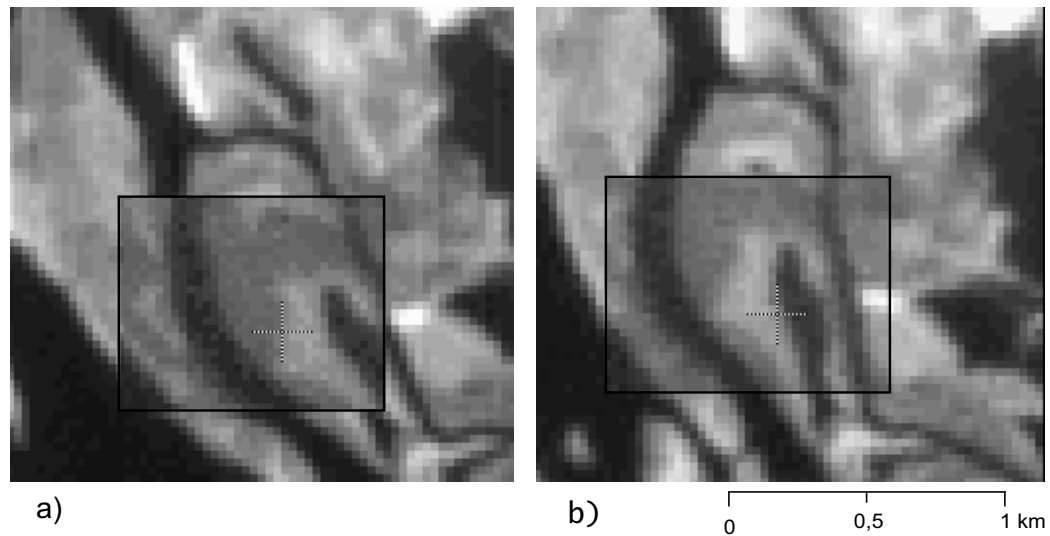
Det ble beregnet wetness index over et lite område fra både Jostedalsbreen og Oslo-området. Disse ble, sammen med gridene som viste tilsigsområdene ifra hvert område, sammenliknet visuelt med wetness indexen og tilsigsområdene fra tilsvarende områder i referansemodellen.

Programmet TAPES-G ble benyttet til beregning av de topografiske parameterne som inngår i wetness indexen (formel 2.2, s. 10). Tilsigsområdene ble beregnet med FD8 MDF algoritmen. Denne algoritmen tillater avrenning fra hver celle til alle nabocellene nedstrøms. Hvor mye som drenerer til hver celle avgjøres ved vekting basert på helningsgradienten. FD8 gir en mye mer realistisk distribusjon av tilsigsområdet enn ved bruk av for eksempel de noe enklere D8 og Rho8 algoritmene.

### 4.3.4 Klassifikasjon av overflatedekke

For å kunne finne ut om det var en sammenheng mellom avvik i terrengmodellen og overflatedekket, ble det utført en maximum likelihood klassifikasjon over området terrengmodellen dekket. Kun de 9 reflektive båndene ble benyttet. I tillegg ble det generert et NDVI bilde for lettere å kunne diskriminere mellom de ulike vegetasjonsklassene. Data fra NIJOS markslagskart fungerte som treningsdata.

klassifikasjonen ble en svært arbeidskrevende prosess, da dette krevde at en del radiometriske og geometriske korreksjoner ble gjennomført før bildene



Figur 4.6: Geometrisk korreksjon av SWIR. Bilde a) viser SWIR bånd 4 med et utsnitt av SWIR bånd 5 over. Forskyvningen bildene imellom kommer tydelig frem i avbildningen av elveløpene. Bilde b) viser det samme oppsettet etter korreksjonen.

var klare til bruk. Fjerning av striper er allerede nevnt. Et annet og større problem var avvik i grunnriss imellom de ulike ASTER båndene. Dette avviket varierte noe, men var typisk 4 - 5 kolonner og 1 - 2 rader. Hvert enkelt bånd måtte derfor georefereres og korrigeres. Orthoengine sin ASTER modell kan kun håndtere VNIR bilder. Derfor ble igjen ENVI benyttet. Her ble det for hvert SWIR og TIR bilde samlet inn kontrollpunkter fra et allerede korrigert ASTER 3n bilde. Deretter ble bildene korrigert med andre ordens polynomisk transformasjon og resamlet med kubisk konvolusjon.

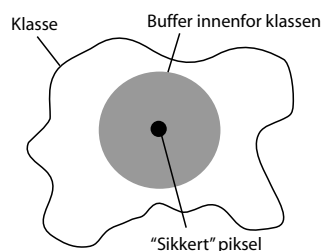
Ved å sammenlikne bildene visuelt ble det fastslått at korreksjonen ga en klar reduksjon i avvikene båndene imellom. Figur 4.6 viser hvordan sammenlikningen ble utført.

Siden det var så mye arbeid med de nevnte korreksjonene, radiometriske og geometriske, ble det ikke satt av tid til ytterlige radiometriske korreksjoner slik som korreksjon for ulike atmosfæriske og topografiske effekter.

Det skulle vise seg at dette absolutt burde vært gjort. Klassifikasjonsresultatene var tydelig preget av de nevnte effektene. Vegetasjonen i sørvendte og nordvendte dalsider ble klassifisert svært forskjellig. Særlig bildene ifra Jostedalsbreen burde vært korrigert for topografiske effekter på belysningen. Det var veldig vanskelig å skille mellom de ulike vegetasjonsklassene som følge av dette.

Bildene fra Oslo-området inneholdt partier med svært tynt skydekke. Dette var av en slik karakter at det ikke ble oppdaget på de synlige og nær-





Figur 4.7: Utvelgelse av klassifiserte punkter. For at kun piksler som var riktig klassifisert skulle bli med videre i analysen, ble bare piksler godt innenfor klassen tatt med.

infrarøde båndene, mens bildene fra de termiske båndene avdekket et stort felt i den østre delen av bildene med skydekke. Dette gjorde at området ble todelt, ett med skyer og ett uten.

Under klassifikasjonen resulterte dette i at samme overflatedekke i de to områdene ble klassifisert forskjellig. Derfor ble det utført to uavhengige klassifikasjoner av de to områdene, som tilslutt ble spleiset sammen.

For å omgå problemet med unøyaktigheter i klassifikasjonen ble det gjort noen tilpasninger. Det ble forsøkt å kun plukke ut sikre klassifiserte piksler til den videre analysen. Det ble antatt at et piksel var riktig klassifisert hvis det var fullstendig omgitt av flere piksler av samme klasse.

Først ble alle de minste områdene i klassifikasjonsresultatet fjernet. Deretter ble det manuelt editert punkter som lå midt inne i områder av samme klasse. Deretter ble det generert en sone rundt disse punktene. Disse sonene ble deretter klippet ut og benyttet som soner til zonalstatsfunksjonen.

#### 4.3.5 Vurdering av nøyaktighet på breen

Siden resultatene fra Jostedalsbreen viste så store avvik mellom den topografiske modellen og ASTER modellen over breen, var det naturlig å utforske årsakene til dette nærmere. Det ble forsøkt å finne ut hvor mye av avviket som kunne skyldes en eventuell økning i bremassen. I tillegg til de overnevnte modellene ble to modeller, generert ut fra flybilder ved geografisk institutt i Oslo, benyttet som sammenlikning. De to modellene dekket to utløpere ifra Jostedalsbreen; Bergsetbreen( $61^{\circ}39'N$ ,  $7^{\circ}04'E$ ) og Nidgardsbreen( $61^{\circ}42'N$ ,  $7^{\circ}08'E$ ). Flybildene som lå til grunn for disse modellene var begge ifra 29. August 2001, altså cirka ett år etter ASTER opptakene. De fotogrammetriske modellene ble regnet som mest nøyaktige, særlig i områder dekket av breen.

Den fotogrammetriske høydemodellen ble resamplet til lik oppløsning som ASTER modellen(30 meter) med kubisk konvolusjon. Et område som kun var dekket av breen ble valgt ut fra hver av de tre modellene for visuell sam-

menlikning og beregning av statistikk. På Nidgardsbreen inneholdt ASTER modellen store felter med ekstreme feil som følge av skyer og deres skygger i satellittbildene. Disse feltene ble ikke oppdaget under editeringen av høydemodellen. Det ble allikevel valgt å fjerne dem ifra denne vurderingen, da de helt tydelig ikke hadde noe med ASTER sine egenskaper til å måle høyder på breen.

Fra hvert område ble det generert to differansemodeller der henholdsvis ASTER modellen og den topografiske høydemodellen ble trukket ifra den fotogrammetriske.

## 5 Resultater

### 5.1 Oppsett av stereomodellen

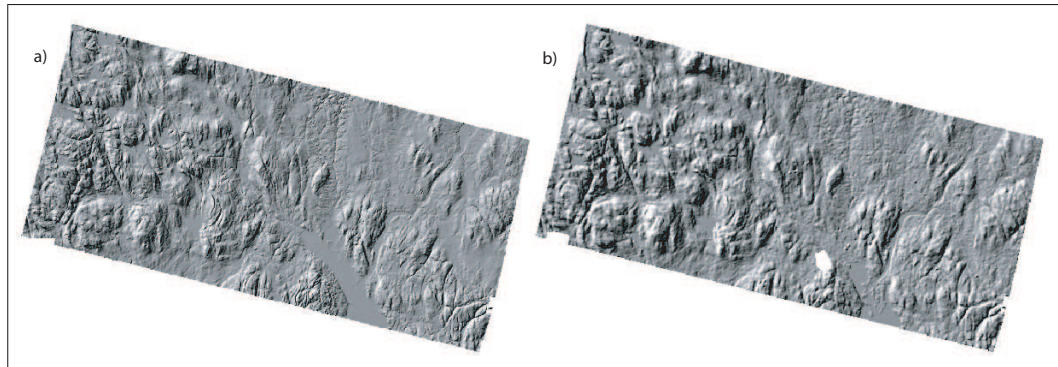
Resultatene etter blokkutjevningen for de to modellene fra Oslo-området og Jostedalsbreen er samlet i tabell 5.1. Her er residualene i kontrollpunktene som lå til grunn for blokkutjevningen og et sett med uavhengige sjekkpunkter tatt med. Punktene er stereopunkter, altså er de samme tilhørende punktene angitt i begge bildene fra hver scene. Residualene for hvert enkelt stereopunkt er tatt med i vedlegg A.1 og vedlegg A.2.

Tabell 5.1: RMSE verdier for residualene etter blokkutjevningen. RMSE verdier for residualene i kontrollpunktene og de uavhengige sjekkpunktene etter absolutt orienteringen av stereomodellene. Verdiene er gitt i meter.

| Kontrollpunkter |      |            |            |              |            | Sjekkpunkter |            |            |              |            |
|-----------------|------|------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|------------|--------------|------------|
| Scene           | Ant. | $\Delta X$ | $\Delta Y$ | $\Delta XYZ$ | $\Delta Z$ | Ant.         | $\Delta X$ | $\Delta Y$ | $\Delta XYZ$ | $\Delta Z$ |
| Oslo            | 14   | 10         | 8          | 17           | 11         | 13           | 24         | 11         | 30           | 13         |
| Jost            | 19   | 10         | 9          | 15           | 9          | 19           | 14         | 12         | 23           | 13         |

RMSE-residualene i kontrollpunktene for modellen fra Oslo-området lå alle innenfor størrelsen på ett piksel i bildet. De eksakte tallene var 10, 8, 11 meter i henholdsvis X, Y og Z koordinatene. De høyeste avvikene var på 19, 7 og 12 meter. Residualene i de uavhengige sjekkpunktene i X, Y og Z var 24, 11 og 13 meter. Her var de høyeste avvikene 37, 31 og 36 meter.

RMSE-residualene i kontrollpunktene for modellen fra Jostedalsbreen var 10, 9, 9 meter i henholdsvis X, Y og Z koordinatene. Her var de høyeste avvikene 22, 20 og 17 meter. Residualene i de uavhengige sjekkpunktene var 14, 12 og 13 meter. De høyest registrerte avvikene var 28, 23 og 38 meter.



Figur 5.1: Skyggemodell fra Oslo-området. a) viser den topografiske høydemodellen, b) viser ASTER modellen.

## 5.2 Høydemodellene

I metodekapittelet er det beskrevet hvordan det ble generert tre forskjellige modeller fra hvert område ettersom hvilke editeringsmetoder som var blitt benyttet på hver av høydemodellene. For hver av disse ble det generert differansem modeller ved å trekke disse fra referansem modellen. De forskjellige modellene ble gitt navnene ODHM1, ODHM2 og ODHM3 for modellene fra Oslo-området. For modellene fra Jostedalsbreen er navnene nesten identiske; JDHM1, JDHM2 og JDHM3.

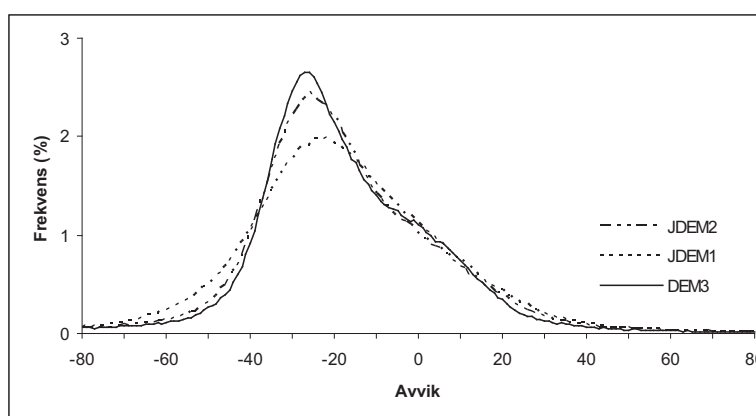
DHM1 er ueditert output etter matchingen i PCI men innholder *ikke* punkter der korrelasjonen feilet. DHM2 er heller ikke editert men her er områder hvor korrelasjonen har feilet tatt med. DHM3 er den samme som ODHM2 med manuell editering utført.

Tabell 5.2 og tabell 5.3 viser at alle differansem modellene hadde negative middelerverdier. Noe som tilsier generelt noe høyere høydeverdier i ASTER modellene i forhold til Referansem modellen. Middeler verdien for all modellene i Oslo-området var -1 meter. RMSE- verdiene varierte fra  $\pm 17$  meter i ODHM2 ned til  $\pm 11$  meter i ODHM3. RMSE verdien i ODHM1 var  $\pm 16$  meter. Ekstreme avvik på opptil 515 og 528 meter ble registrert i henholdsvis ODHM1 og ODHM2. Det største avviket i ODHM3 var 80 meter.

Høydemodellene ifra Jostedalsbreen hadde alle et midlere avvik som lå langt under 0. De eksakte tallene var henholdsvis -18, -23 og -21 for JDHM1, JDHM2 og JDHM3 (Tabell 5.3). Middeler verdien hadde altså forskjøvet seg med omtrent 5 meter ved å interpolere over punkter som feilet under matchingen. Etter editeringen ble midlere avviket igjen noe lavere, men var fortsatt på betydelige -21 meter. Figur 5.2 viser en sammelikning av fordelingene til de ulike differansem modellene. Ekstremalverdiene viste at punkter

Tabell 5.2: Deskriptiv statistikk fra ODHM

| Terrengmodell | Minimum | Maksimum | Middelverdi | StDev | RMSE |
|---------------|---------|----------|-------------|-------|------|
| ODHM1         | -515    | 280      | -1          | 16    | 16   |
| ODHM2         | -491    | 528      | -1          | 17    | 17   |
| ODHM3         | -72     | 80       | -1          | 11    | 11   |



Figur 5.2: Frekvensfordistribusjon av JDHM1, JDHM2 og JDHM3

med feil helt opp til i overkant av 1000 meter i hver retning eksisterte i alle tre modellene. RMSE verdiene ble dermed også svært høye ( $\pm 43$ ,  $\pm 64$ ,  $\pm 58$  for JDHM1, JDHM2, JDHM3).

Tabell 5.3: Deskriptiv statistikk fra JDHM

| Terrengmodell | Minimum | Maksimum | Middelverdi | StDev | RMSE |
|---------------|---------|----------|-------------|-------|------|
| JDHM1         | -1190   | 1569     | -18         | 39    | 43   |
| JDHM2         | -1032   | 1370     | -23         | 60    | 64   |
| JDHM3         | -981    | 1205     | -21         | 53    | 58   |

Sammenlikning av skyggemodellene fra de to områdene med tilsvarende skyggemodeller fra REFDHM viste et generelt godt samsvar mellom dem, men at finere detaljer er synlige i REFDHM. Figur 5.1 viser at små dreneringsmønstre godt synlige i REFDHM er visket bort i skyggemodellen av ODHM3. Generelt virker ASTER modellene noe uskarpe i forhold til referansemodellene. Modellen ifra Jostedalsbreen inneholder en rekke små men godt synlige kjegleformede topper og groper(bilde b), figur 5.5). Disse er

særlig fremtrede oppå breen der overflaten vanligvis er relativt jevn.

For å få et bilde over hvordan høydeavvikene fordeler seg horisontalt er differansemodellene for ODHM3 og JDHM3 visualisert i henholdsvis figur 5.3 og figur 5.6 på side 41 og 43.

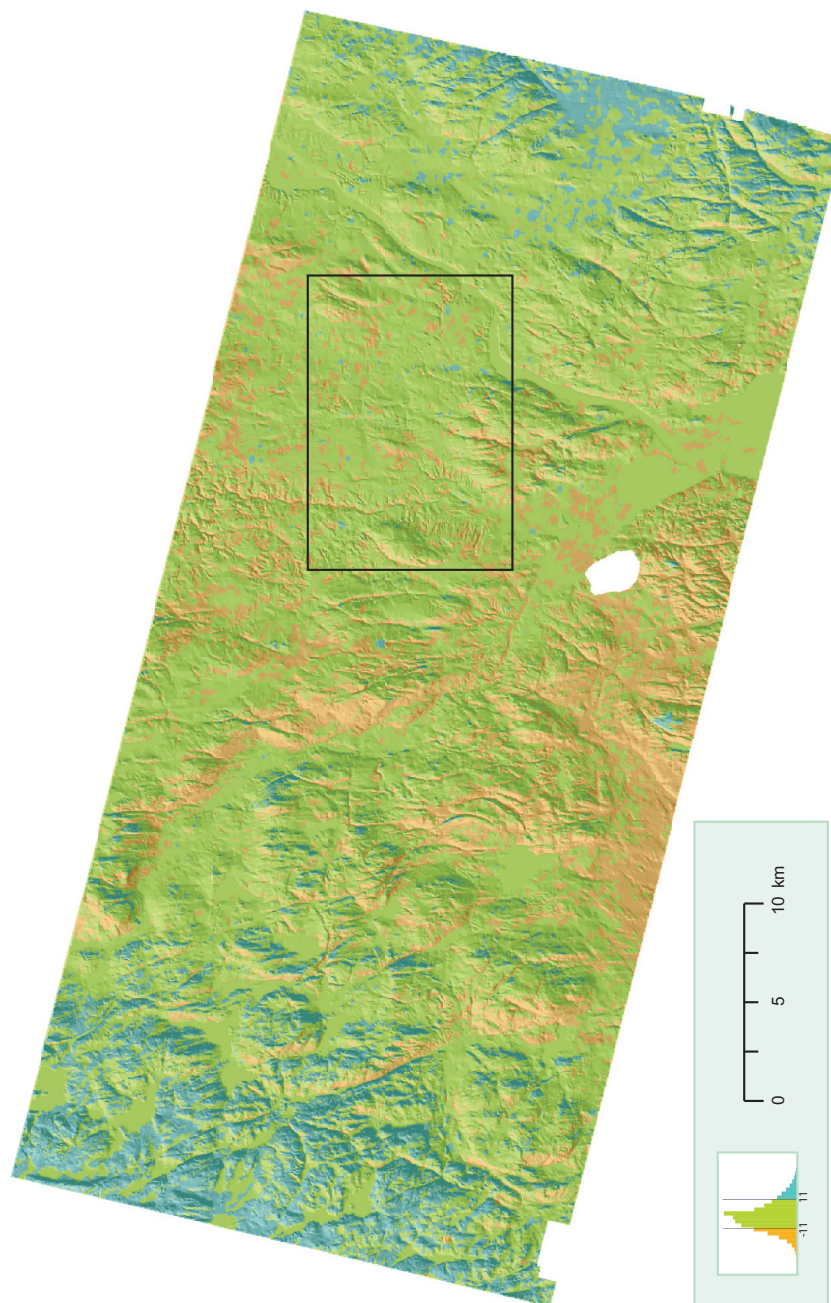
Differansebildet ifra Oslo-området viser at de positive avvikene, der hvor ASTER modellen ligger lavere enn REFDM, befinner seg for det meste i de østre og vestre delene av bildet. I de sentrale delene, og delene med mye bebyggelse, finnes det store sammenhengende områder der ASTER modellen ligger for høyt. I den vestre delen av bildet synes en dal der den vestre delen har gjennomgående positive avvik mens den østre delen inneholder negative. Generelt kan det se ut som om skillet mellom positive, normale og negative avvik løper i en tilnærmet Nordvest - Sørøst retning.

Differansebildet fra Jostedalsbreen i figur 5.6 på side 43, viser at nesten hele platået som er dekket av breen, inneholder negative avvik over 15 meter. I slake høytliggende områder som ikke er dekket av snø eller is, kan det se ut som at modellene stemmer godt overens. Dette kommer tydelig frem i det sydligste partiet av figur 5.7 på side 44. Nede i dalbunnen ligger høydeverdiene stort sett innefor  $\pm 15$  meter intervallet. Positive avvik finnes kun i relativt bratte helninger og da særlige i dalsider vendt nordover. Mesteparten av bildet inneholder negative avvik.

De sorte firkantene på begge differansebildene angir subområdene plukket ut for sammenlikning av koter. Disse er visualisert i figur 5.4 på side 42 ifra Oslo-området, og figur 5.7 på side 44 ifra Jostedalsbreen.

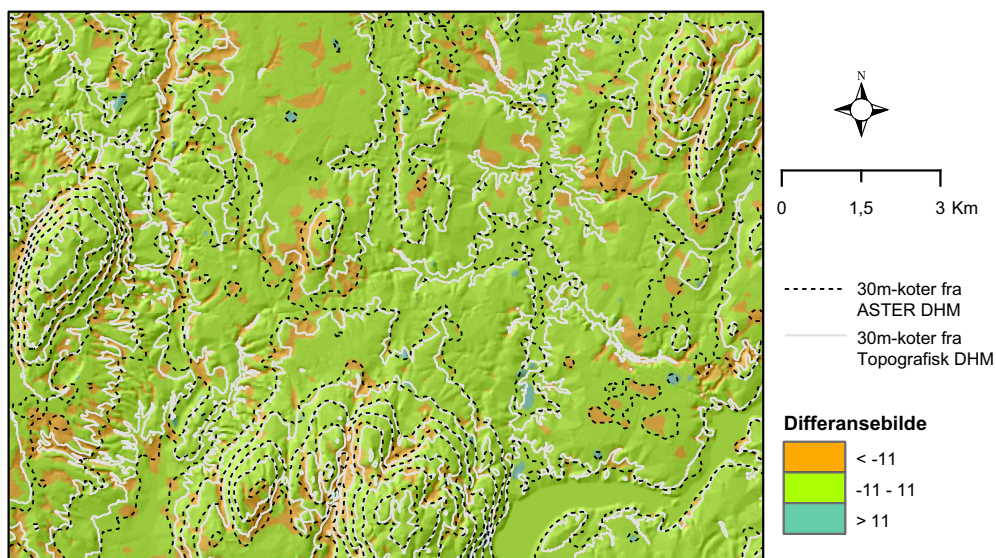
Figur 5.4 viser et relativt flatt område like nord for lillestrøm. En liten del av Glomma er synlig nede i høyre bildekant. Kotene fra de to ulike datasettene synes å ligge nokså tett. Unntaket er der hvor det er smale dreneringsmønstre i terrenget som er blitt glattet over i ASTER modellen. Kotene ifra den topografiske høydemodellen gjenspeiler det faktum at denne modellen inneholder flere detaljer enn tilsvarende ifra ASTER. Profilene Oslo-området viser også at en del detaljer i landskapet er blitt glattet over i ASTER modellen (fig. 5.8).

Bildet ifra Jostedalsbreen i figur 5.7 viser at kotene fra ASTER DHM inneholder en del små feil i tillegg til store områder med grove feil. Disse oppstår i de bratteste skråningene i utsnittet. I områder dekket av breen nedover i dalen, ligger kotene relativt langt ifra hverandre. Oppå fjellryggen lengst syd i bildet, er det nesten ikke mulig å skjelne avstand mellom kotene.

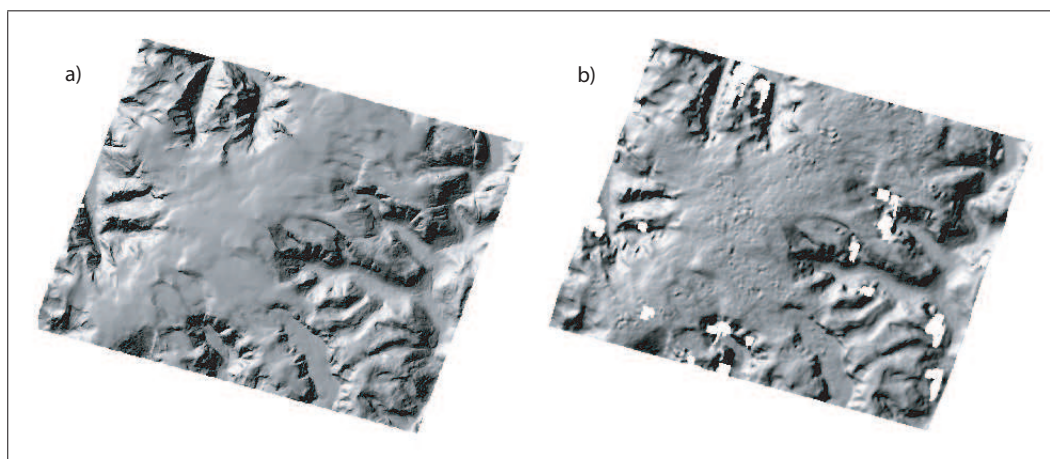


Figur 5.3: Differansebilde fra Oslo-området. Differansen mellom astermodellen og referansemodellen delt i tre klasser og drapert over skyggemodell.



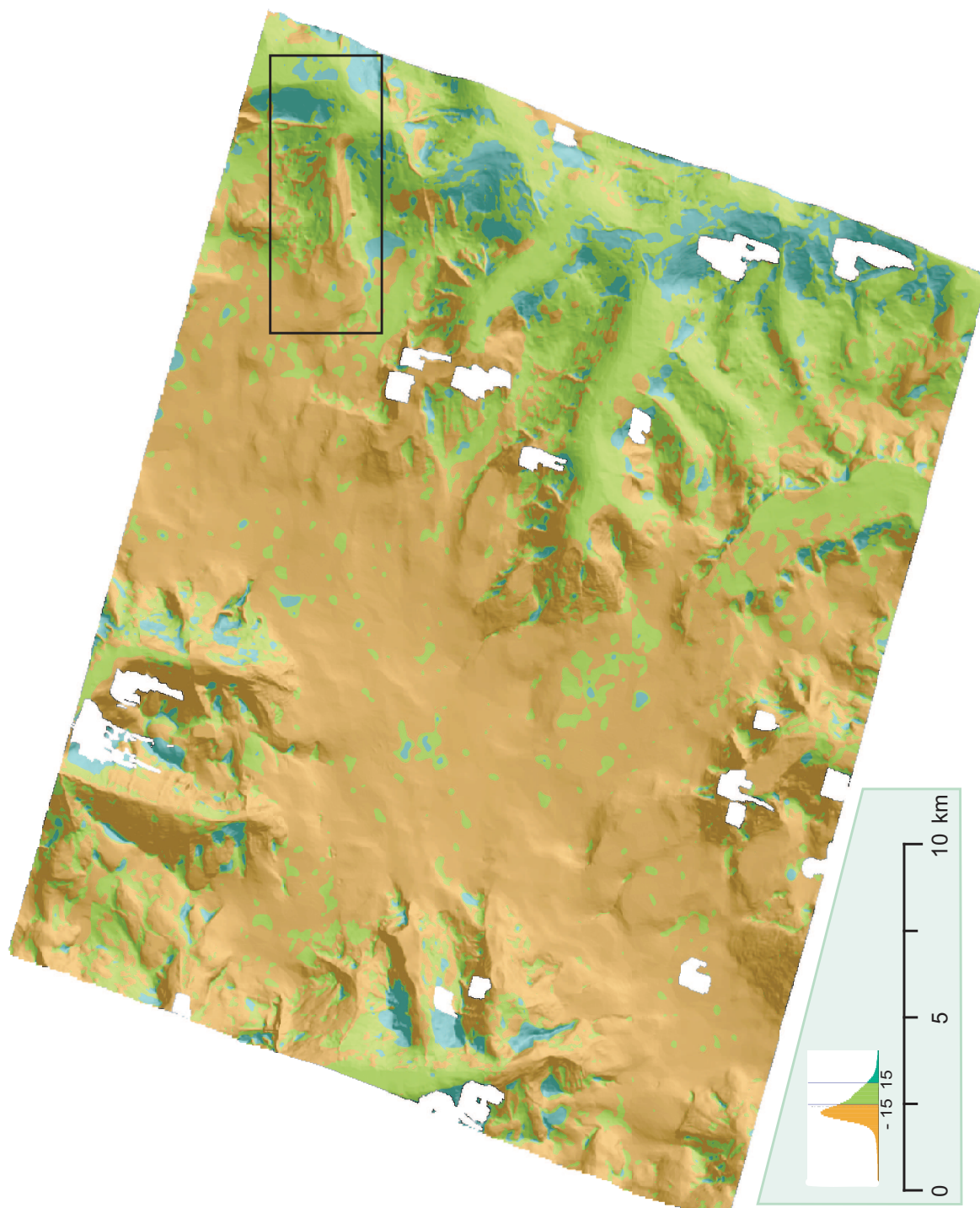


Figur 5.4: Sammenlikning av koter fra Oslo-området Utsnitt fra figur 5.3 med 30 meters koter fra ODHM3 og REFDHM.

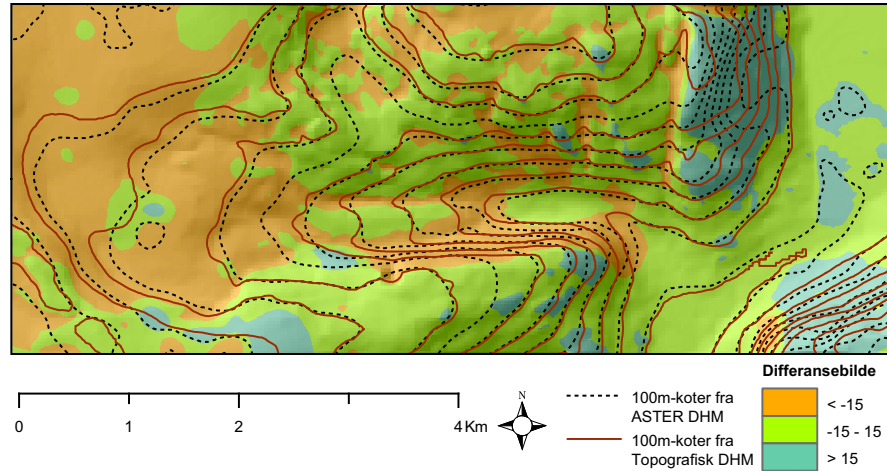


Figur 5.5: Skyggemodeller fra Jostedalsbreen. a) Topografiske høydemodell (REFDHM). b) ASTER (JDHM3).





Figur 5.6: Differansebilde fra Jostedalsbreen. Differansen mellom astermodellen og referansemodellen delt i tre klasser og drapert over skyggemodell.



Figur 5.7: Sammenlikning av koter fra Jostedalsbreen. Utsnitt fra figur 5.6 med 30 meters koter fra JDHM3 og REFDHM.

### 5.3 Avvik innenfor ulik topografi og markslag

Det ble gjort en vurdering hvilken grad topografiske attributter slik som helning og aspekt samt markslag, påvirket kvaliteten på ASTER modellen.

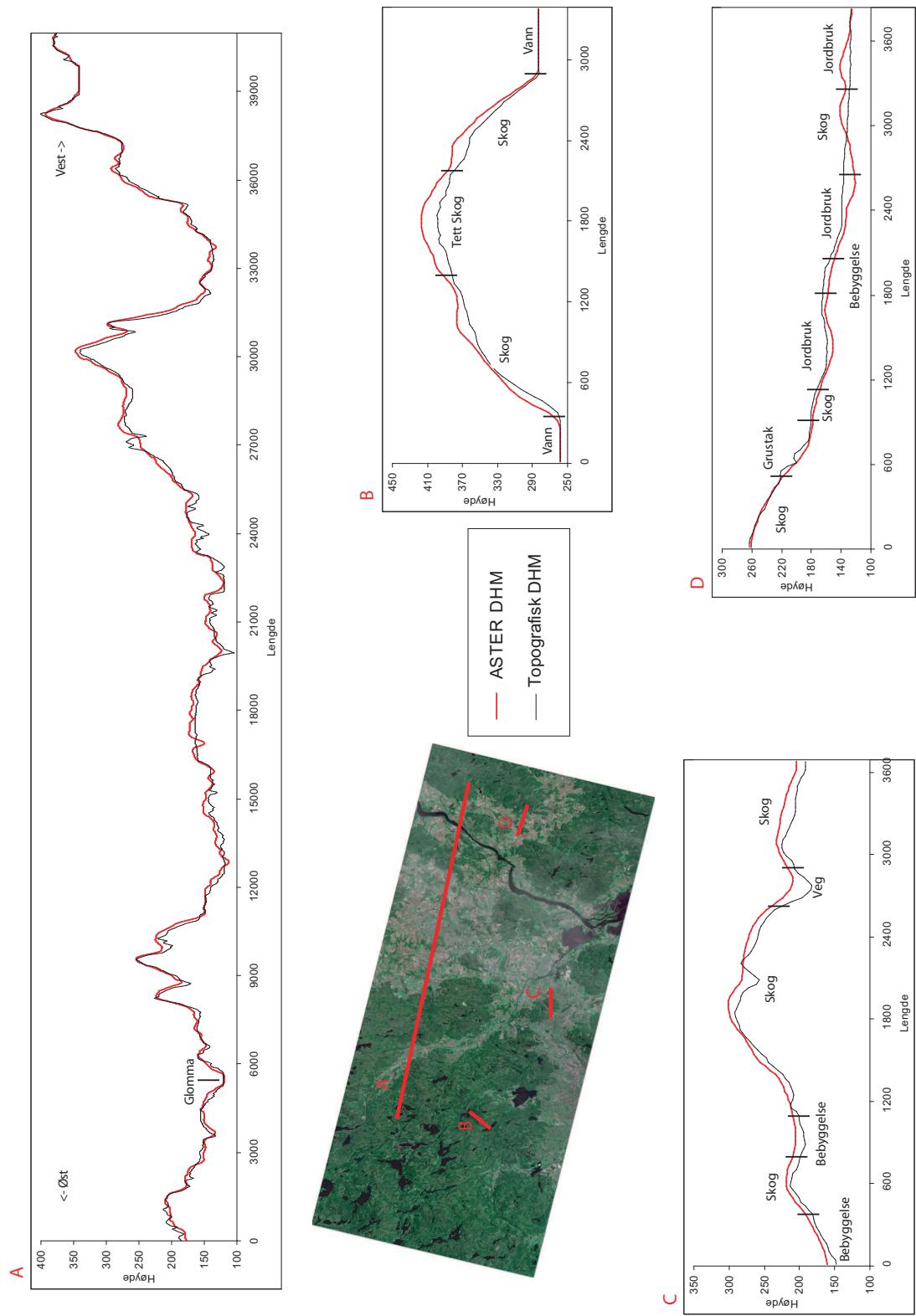
#### 5.3.1 Oslo-området

Avvikene mellom ASTER DHM og REFDHM hadde en tendens til å øke i takt med helningen i terrenget. RMSE verdiene steg jevnt fra  $\pm 8,2$  meter i de flate partiene, til  $\pm 14$  meter i de bratteste. Samtidig steg middelverdien fra -2 meter til cirka 0 meter. Variasjonen var altså ikke særlig stor men diagrammet i figur 5.10 viser tydelig den jevne stigningen i avvikene med helningen.

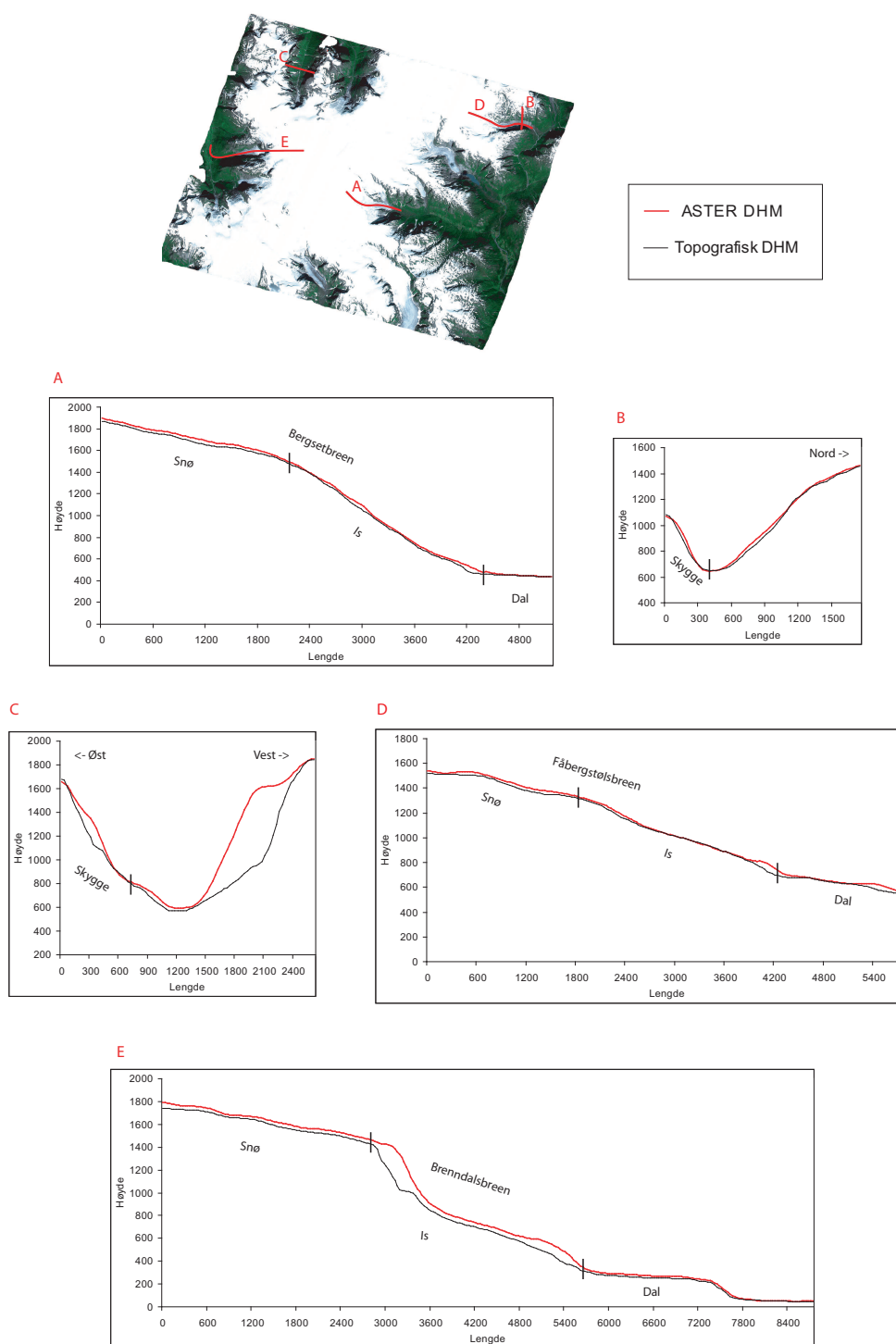
RMSE verdiene varierte nokså lite innenfor de ulike helningsretningene. Hvis man ser bort ifra terreng klassifisert som flatt, lå samtlige verdier innenfor  $\pm 1$  meter (figur 5.11). RMSE verdien i flatt terreng var  $\pm 6,1$  meter. Dette lave tallet kommer av at høyden for alle de største vannene ble lagt inn manuelt under editeringen.

Middelverdiene av høydeavviks-observasjonene innenfor de ulike aspektklassene viste et tydelig mønster som kan beskrives som en flatpresset sinus-bølge med bølgetopp i østlig retning(0.7 meter), og bunn i vestlig retning(-4.5 meter). Dette mønsteret kommer tydelig frem i diagrammet i figur 5.11.

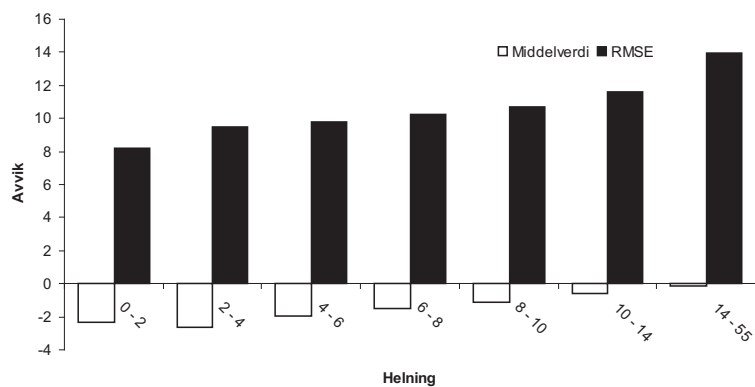
Sammelikning av avvikene innenfor ulike vegetasjonsklasser, eller marks-



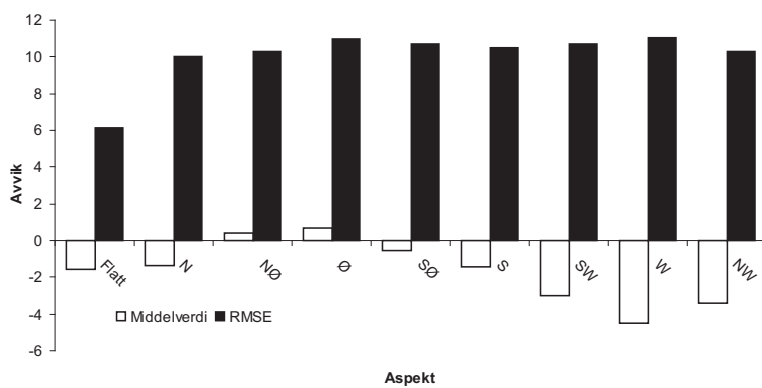
Figur 5.8: Høydeprofiler fra Oslo-området.



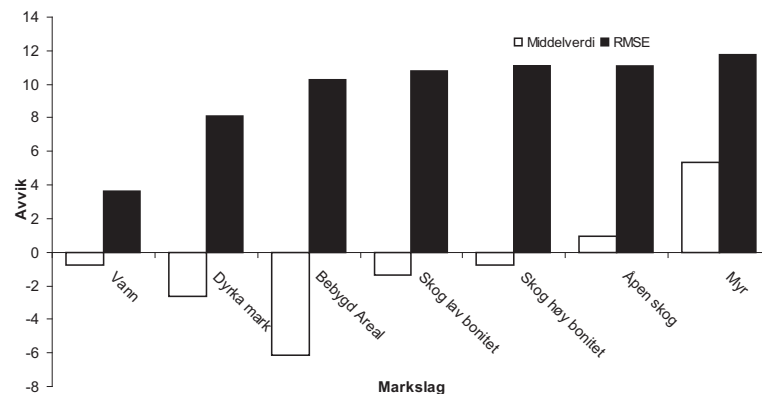
Figur 5.9: Høydeprofiler fra Jostedalsglaci.



Figur 5.10: Høydeavvik mot helning, ODHM. Middelverdien og RMSE av avvikene mellom ODHM og REFDHM, beregnet innenfor forskjellige helningsklasser.



Figur 5.11: Høydeavvik mot aspekt, ODHM. Middelverdien og RMSE av avvikene mellom ODHM og REFDHM, beregnet innenfor klassifiserte helningsretninger.



Figur 5.12: Høydeavvik mot markslag, ODHM RMSE og middelerdier for høydeavvikene innenfor ulike markslagsklasser.

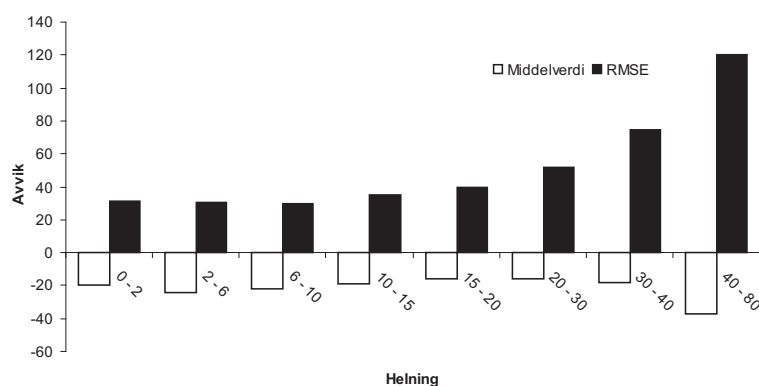
lag, viste verdiene varierte en god del. Dette gjelder særlig hvis man sammenlikner middelerdiene (figur 5.12). Disse viste at områder klassifisert som bebyggt areal hadde klart lavest middelerdi, -6 meter, av alle klassene. Dyrka mark hadde de nest laveste med -2,6 meter. Middelerdiene i skogsområdene var henholdsvis -1,4 meter og 0,8 meter for skog med lav bonitet og skog med høy bonitet. Det var ventet at områder med skog ville gi høyere høydeverdier i ASTER modellen. Profilene ifra Oslo-området viste heller ikke noen sammenheng mellom områder med skog og høydeforskjell (fig. 5.8). Myrområdene skilte seg kraftig ut fra resten med en positiv middelerdi i overkant av 5 meter. RMSE verdiene viste en relativ høy konsistens gjennom de samme klassene. Disse ligger alle mellom  $\pm 10 - 12$  meter. Unntakene er vann og dyrka mark med henholdsvis  $\pm 4$  meter og  $\pm 8$  meter.

### 5.3.2 Jostedalsbreen

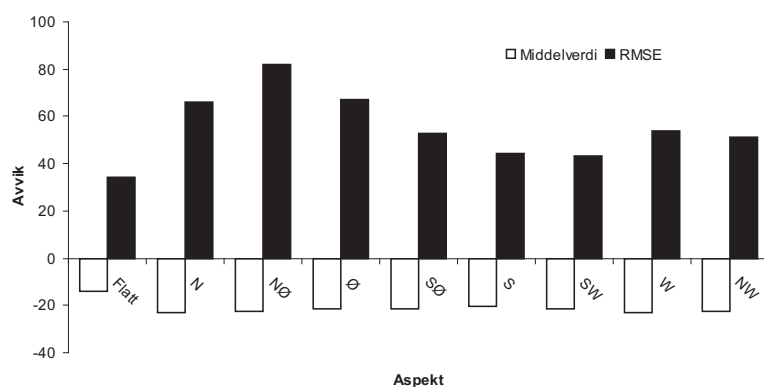
Også høydeavvikene i differansemодellen ifra Jostedalsbreen viste en tydelig tendens til å øke i takt med helningsgradienten (5.13). Riktignok var RMSE-verdien noe høyere i flatt terreng (31 meter) enn i slake helninger (30 meter). Men etter dette økte RMSE jevnt opp til 120 meter i de aller bratteste skrentene (40-80 grader).

De midlere avvikene varierte relativt lite. Med unntak av midlere avvik for 40 - 80 graders helning (-37 m), holdt de seg innenfor -15 m i 15 - 20 graders helning til -24 m i 2-6 graders helning.

Diagrammet i figur 5.14 viser RMSE og de midlere avvikene fra JDHM innenfor de ni aspektklassene. Ovenfor i tilsvarende diagram fra Oslo-området, står det beskrevet hvordan de midlere avvikene formet en slags sinuskurve



Figur 5.13: Høydeavvik mot helning, JDHM. Høydedifferansen mellom modellene innenfor ulike helningsklasser. Helningen ble beregnet ut fra REFDHM.

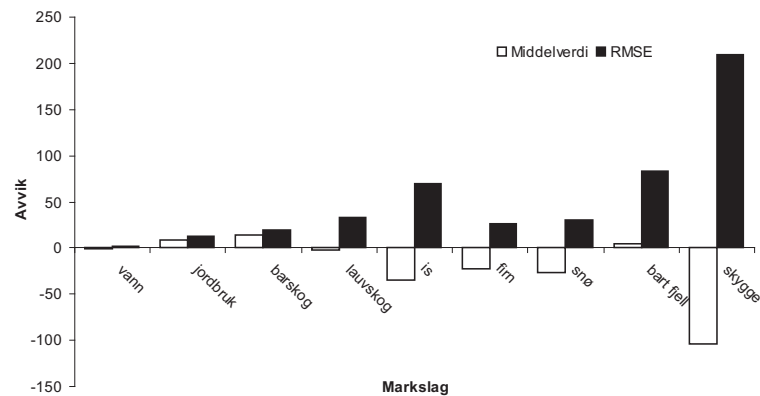


Figur 5.14: Høydeavvik mot aspekt, JDHM. Middelverdien og RMSE av avvikene mellom JDHM og REFDHM, beregnet innenfor klassifiserte helningsretninger.

mens RMSE viste relativt lite variasjon. Her er disse rollene byttet om, RMSE viser variasjon med helningsretningen mens det midlere avviket holder seg relativt konstant omkring -21. RMSE har en topp på 81 m i Nordøstretningen og en bunn på 43 meter i sørvestlig retning.

RMSE verdiene og middelverdiene av avvikene innenfor de utvalgte markslagsslagene varierte kraftig også i dette området. Resultatene er fremstilt grafisk i stolpediagrammet på figur 5.15. Avvikene var naturlig nok desidert størst i områder som lå i solskyggen. Her var det midlere avviket -104 meter og RMSE verdien  $\pm 209$  meter. Områder klassifisert som bart fjell kom deretter med henholdsvis 4 meter og  $\pm 83$  meter.

Skyggemodellen av ASTER modellen fra Jostedalsbreen viste en relativt ujevn breoverflate som ikke lignet på hva man kunne forvente at en breover-



Figur 5.15: Høydeavvik mot markslag, JDHM. RMSE og middelerverdier for høydeavvikene innenfor ulike markslagsklasser.

flate skulle se ut som. Dette bekreftes av RMSE verdiene og middelerverdiene for markslagsklassene snø, firn og is. Middelerverdiene for disse klassene var -26, -22 og -35 meter. De tilsvarende RMSE verdiene var  $\pm 29$ ,  $\pm 25$  og  $\pm 69$  meter.

I de gjenstående klassene var avvikene mindre. Midlere avvik og RMSE var -2 meter og  $\pm 33$  meter for lauvskog og 14 meter og  $\pm 19$  meter for barskog. I områder klassifisert som jordbruk var tilsvarende tall 8 meter og  $\pm 12$  meter. Siden høydene på vannene var manuelt editert, var avvikene her kun -1 meter og  $\pm 2$  meter.

## 5.4 Beregning av topografiske parametere

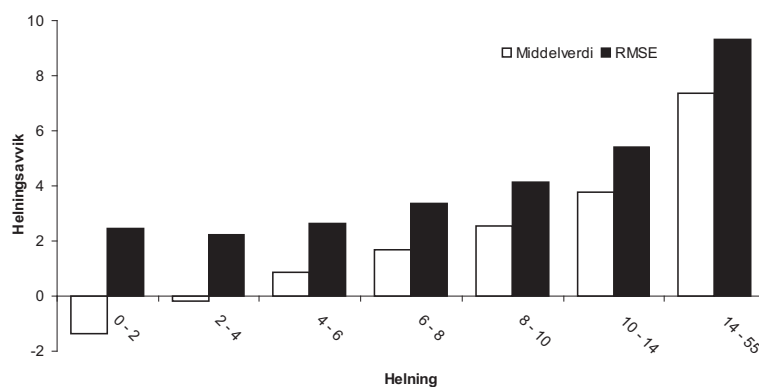
### Helningsgradienten

Differansen mellom helningsgridene ifra Oslo-området viste at RMSE-verdien var større i de flateste partiene ( $\pm 2.5^\circ$  innenfor  $0-2^\circ$ ) enn i slake helninger ( $\pm 2.5^\circ$  innenfor  $2-4^\circ$ ). Deretter økte avvikene stadig kraftigere med helningen oppover (fig. 5.16). Middelerverdiene viste at helningene var overdrevet i de flateste partiene av ASTER modellen, mens helningene i de brattere partiene var systematisk underdrevet. Middelerverdiene steg hele veien ifra  $-1.3^\circ$  til  $7.4^\circ$ .

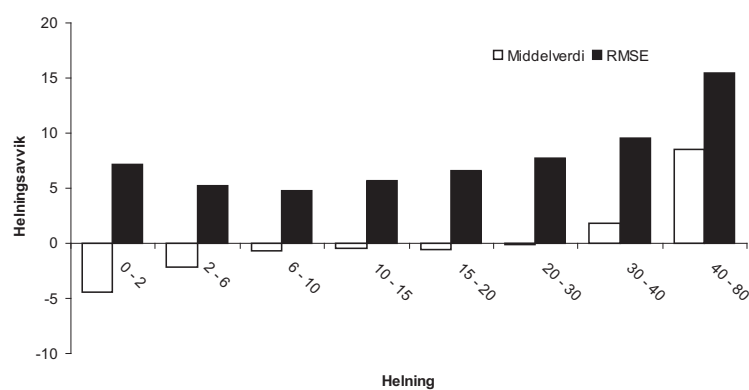
Figuren for helningsavvik ifra Jostedalbreen (fig. 5.17) var relativt lik tilsvarende ifra Oslo-området. Også her minket først avvikene ifra de flateste partiene ( $\pm 7.25^\circ$  innenfor  $0-2^\circ$ ) til de slake ( $\pm 5.2^\circ$  innenfor  $2-6^\circ$  og  $\pm 4.8^\circ$  innenfor  $6-10^\circ$ ), for så å øke oppover til de bratteste partiene ( $\pm 15.4^\circ$  innenfor  $40-80^\circ$ ).

Middelerverdiene viste at helningene i ASTER modellen var systematisk





Figur 5.16: Helningsavvik mot helning, ODHM. Helningsdifferansen mellom astermodellen og referansemodellen, innenfor ulike helningsklasser. Modellene er fra Oslo-området.



Figur 5.17: Helningsavvik mot helning, JDHM. Histogrammet viser hvordan differansen i helning mellom astermodellen og referansemodellen, fra Jostedalsbreen, varierer innenfor ulike helningsklasser.

overdrevet i slake partier mens de var systematisk underdrevet i de bratteste partiene. I moderate helninger var det ikke noe systematiske avvik mellom helningsgradientene i de to høydemodellene.

### Wetness indeksen

Resultatene fra beregningen av tilsigsområde og wetness indeks for et utsnitt av Oslo-området er visualisert i figur 5.18 på side 53.

Tilsigsområdene viser den romlige fordelingen til de viktigste dreneringskanalene i landskapet. En sammenlikning av disse i figur 5.18 viste at dreneringen i utsnittet fra ASTER modellen samlet seg i færre store kanaler i forhold til referansemodellen. Plasseringen av kanalene stemte godt.

Modellene med Wetness indeksen ifra de samme områdene var nokså ulike. Referansemodellen viste høyere romlig variasjon og inneholdt mer detaljert informasjon.

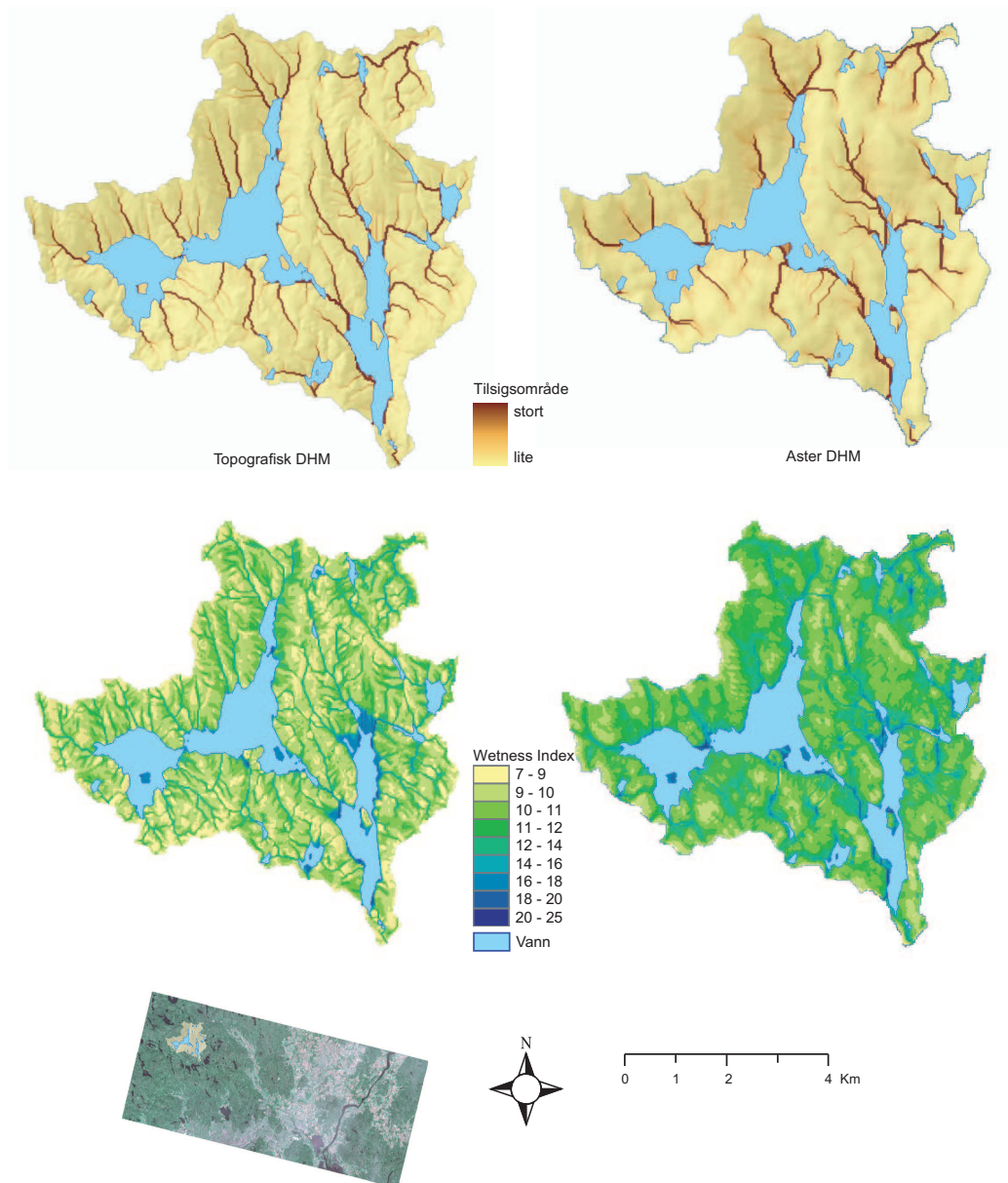
Wetness indeksen og tilsigsområdet for et utsnitt av Jostedalsbreen, som inneholder Fåbergstølsbreen, fjellene omkring og dalen nedenfor, er visualisert i figur 5.19 på side 54. Modellene ifra ASTER og referansemodellen er tatt med i figuren. En sammenlikning at dreneringskanalene på tilsigsområdemodellene viste at ASTER modellen stemte godt noen steder mens den enkelte steder inneholdt kanaler som ikke eksisterte i referansemodellen. Disse kanalene lå i områder hvor det tidligere har blitt påvist at høydemodellen ifra ASTER inneholdt store feil. Modellene med Wetness indeksene ifra samme utsnitt inneholdt naturligvis også store avvik i nevnte områder. Ellers i dalsidene og nede i dalbunnen var verdiene relativt like. Også her inneholdt referansemodellen mest detaljer, men forskjellene var ikke like store som i utsnittet ifra Oslo-området.

## 5.5 Vurdering av nøyaktighet på breen

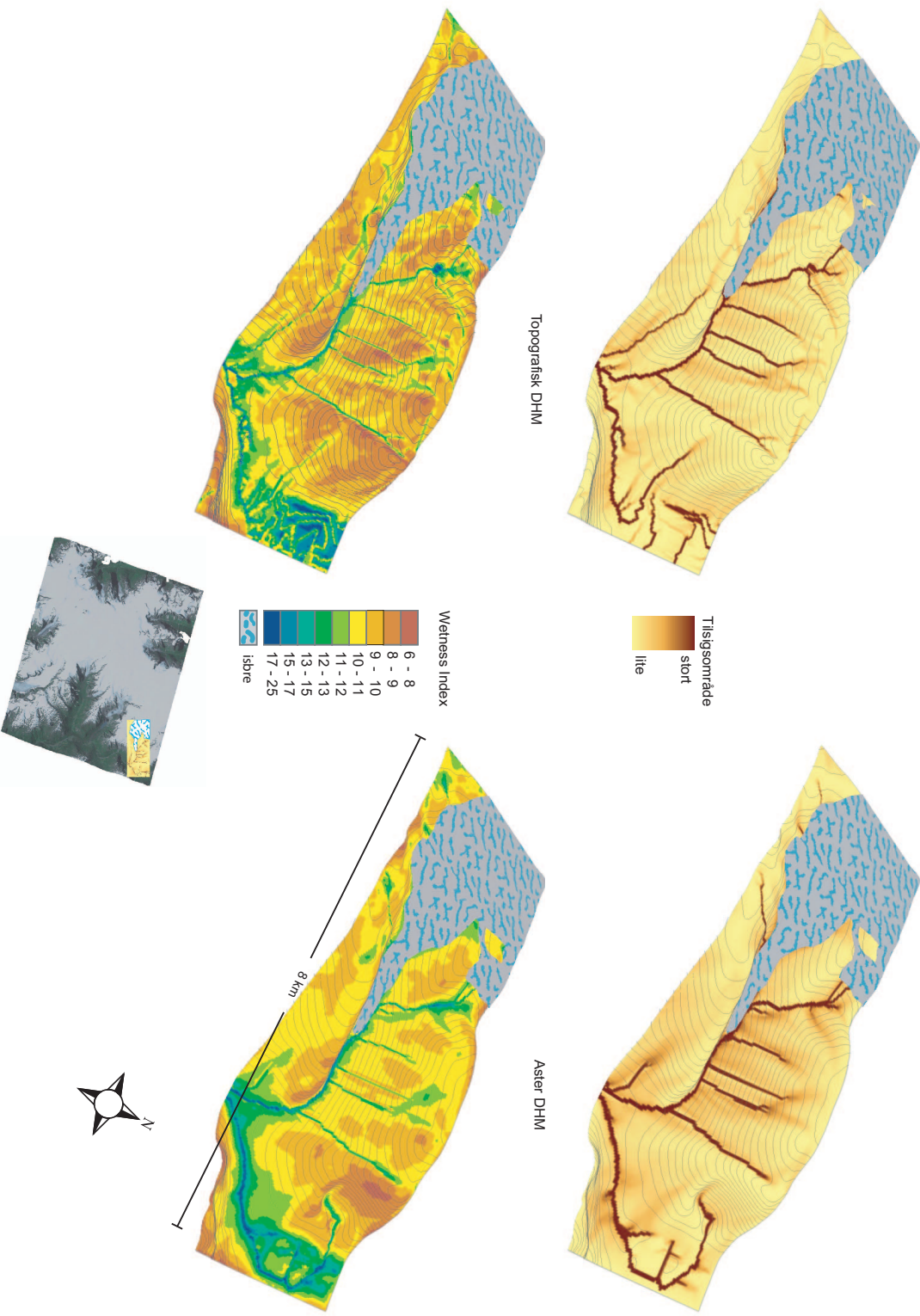
### 5.5.1 Bergsetbreen

Differansen mellom den fotogrammetriske høydemodellen(foto-dhm) og den topografiske(topo-dhm) viser hvordan breen har rykket frem i tiden mellom opptakene av flybildene som har dannet grunnlaget for modellene(1993 - 2001). det midlere avviket var 6 meter, noe som antyder en betydelig generell vekst i bremassen. Medianverdien, standardavviket og RMSE var henholdsvis 5, 9 og 11 meter (Tabell 5.5.1).

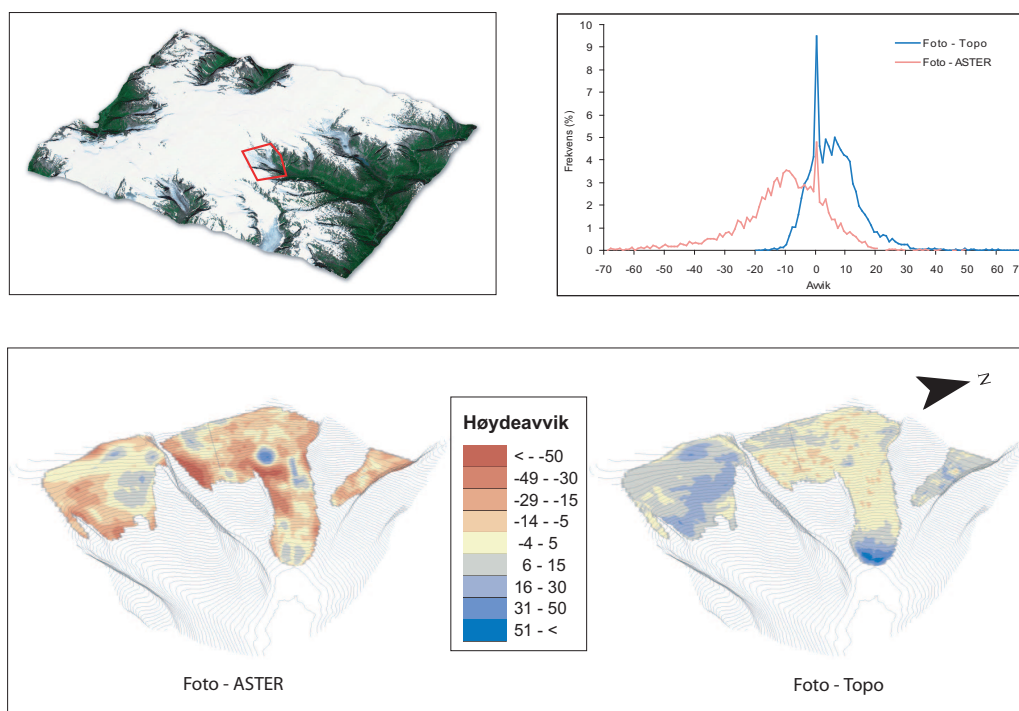
Det midlere avviket mellom ASTER modellen og foto-dhm, for samme område, var -11 meter. Her var medianverdien, standardavviket og RMSE henholdsvis -9, 15 og 19 meter.



Figur 5.18: Tilsgsområde og wetness index ifra Oslo-området



Figur 5.19: Wetness index fra Jostedalsgreen



Figur 5.20: Høydifferanser over Bergsetbreen Høydifferansen mellom den fotogrammetriske modellen(foto) og ASTER modellen er visualisert i vinduet nederst til venstre. Til høyre for dette; differansemodellen mellom foto og den topografiske høydemodellen. Histogrammene til de to differansemodellene er sammenliknet i vinduet oppe til venstre.

Tabell 5.4: Deskriptiv statistikk fra Bergsetbreen ASTER modellen og den topografiske modellen er blitt trukket ifra den fotogrammetriske som regnes som den mest korrekte

| Terrengmodell   | Middelverdi | Median | StDev | RMSE |
|-----------------|-------------|--------|-------|------|
| ASTER DHM       | -11         | -9     | 15    | 19   |
| Topografisk DHM | 6           | 5      | 9     | 11   |

Avvikene mellom topo-dhm og foto-dhm var størst fremme ved fronten av Bergsetbreen. Differansebildene i figur 5.20 på side 55 viser at forskjellen var på over 50 meter noen steder. Videre oppover på breen var avvikene innenfor  $\pm 5$  meter. Nord for Bergsetbreen ligger Baklibreen. Avvikene var her positive over hele breen. Syd for Bergsetbreen ligger et parti som hvor avvikene også er positive fra 0 til 30 meter.

Avvikene mellom foto-dhm og ASTER-dhm i samme figur viser at ASTER modellen generelt ligger enda høyere enn foto-dhm. Felter med høye positive eller negative avvik skyldes antakelig feil i ASTER modellen. Et eksempel på et slikt feilt er det sirkelformede området ca. midt i figuren. Denne gropen i ASTER modellen kan helt klart ikke blitt dannet av naturlige årsaker.

Frekvensfordelingene til de to differansmodellene er sammenliknet i figur 5.20. De viser hvordan ASTER modellen ligger klart høyere enn den fotogrammetriske, mens breen i den topografiske modellen fra Statens kartverk stort sett er målt lavere.

### 5.5.2 Nidgardsbreen

Sammenliknet med Den fotogrammetriske høydemodellen ifra Nidgardsbreen, lå ASTER modellen noe høyere. Det midlere avviket var på -12 meter. Medianverdien, standardavviket og RMSE var henholdsvis -10, 12 og 17 meter (tabell 5.5.2). Merk at store deler av den nederste biten av breen ikke er tatt med i beregningene siden ASTER modellen inneholdt store feil.

Tabell 5.5: Deskriptiv statistikk fra Nidgardsbreen

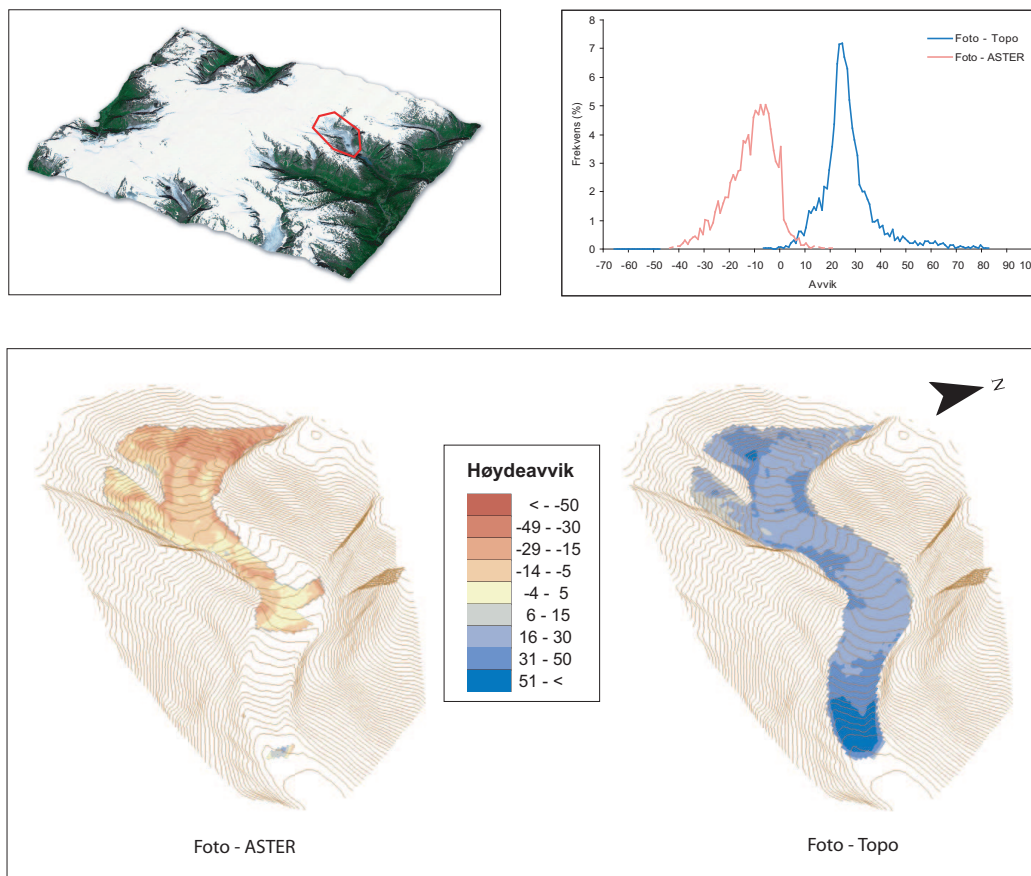
| Terrengmodell   | Middelverdi | Median | StDev | RMSE |
|-----------------|-------------|--------|-------|------|
| ASTER DHM       | -12         | -10    | 12    | 17   |
| Topografisk DHM | 27          | 25     | 11    | 29   |

Bildet av foto - ASTER i figur 5.21 på side 5.21 tyder på at de negative avvikene mellom modellene økte oppover på breen.

Differansebildet mellom den fotogrammetriske høydemodellen og den topografiske (foto - topo) i samme figur, viste gjennomgående positive avvik over hele breen. Nede ved brefronten var avvikene over 50 meter, mens for resten av breen var de fra omkring 15 til 30 meter.

Det midlere avviket var 27 meter. Medianverdien, standardavviket og RMSE var henholdsvis 25, 11 og 29 meter (tabell 5.5.2).

Sammenliknet med resultatene fra Bergsetbreen, var avvikene mellom foto-dhm og topo-dhm betydelig større ved Nidgardsbreen.



Figur 5.21: Høydedifferanser over Nidgardsbreen





## 6 Diskusjon

### 6.1 Oppsett av stereomodellen

Residualene som er sammenfattet tabell 5.1 og vedleggene A.1 og A.2 gir en pekepinn på nøyaktigheten man kan forvente i den endelige høydemodellen. Dette gjelder særlig de uavhengige sjekkpunktene. Usikkerhet i kontrollpunktene sammen med kvaliteten på korrelasjonsprosedyren og B/H-ratioen, er som tidligere nevnt i kapittel 2.2.4, de tre hovedfaktorene som bestemmer kvaliteten i den endelige høydemodellen.

Pikslene i ASTER-bildene dekker som kjent 15 meter på bakken. Dette fører til at hvert piksel inneholder målte radiansverdier fra flere ulike spektrale klasser. Dette setter begrensninger på hva som i hele tatt er synlig i bildet og på hvor nøyaktig det er mulig å fastslå grensen mellom for eksempel to så ulike klasser som vann og land. Eksakt hvor nøyaktig det er mulig å finne den korrekte plasseringen for kontrollpunktene er vanskelig å fastslå. Det avhenger blant annet av hva slags objekt man forsøker å finne. Et vegkryss vil ofte bestå av flere piksler mens enden på en odde vil kanskje begrense seg til ett. Toutin (2002) antyder en nøyaktighet på ett piksel. Siden arbeidet med å registrere kontrollpunkter ble gjort manuelt stiller det også krav til at operatøren har et noenlunde trent øye.

Kontrollpunktene som ble hentet ifra digitaliserte papirkart vil også inneholde en viss unøyaktighet avhengig av karttype og målestokk. Det er klart at en horisontal nøyaktighet i 1:50000 kartene på  $\pm 10$  meter vil påvirke residualene i kontrollpunktene. For å løse dette problemet kunne man valgt ut tydelige og godt distribuerte objekter i bildene og stedfestet disse nøyaktig med differensial GPS. Dette er derimot svært tidkrevende og kostbart. Dessuten var et av målene med denne oppgaven å benytte seg av relativt enkle hjelpemidler, slik som situasjonen ofte er.

Resultatene etter oppsettet av stereomodellen viser at RMSE-verdiene til residualene for kontrollpunktene i X, Y og Z fra begge modellene, alle ligger omkring 10 - 15 meter. Dette er litt bedre enn nøyaktigheten man kan forvente å oppnå under plottingene av punktene. De tilsvarende RMSE-

verdiene for de uavhengige sjekkpunktene er noe høyere, men de fleste ligger innefor pikselstørrelsen. Unntaket er RMSE verdien av x-residualene i de uavhengige sjekkpunktene for Oslo-området (24 meter). Det har ikke lyktes å finne noen løsning på hvorfor denne verdien er så høy i forhold de resterende. Det er heller ikke blitt funnet andre liknende eksempler ifra litteraturen. Riktignok kan det ofte virke som residualene er noe høyere i x-retningen enn y-retningen (figur 6.1), men resultatet ifra Oslo-området var klart høyere enn hva man kunne forvente. Det ble forsøkt å variere sammensetningen og antallet kontrollpunkter. Noen punkter ble fjernet mens andre ble lagt til uten at RMSE-verdiene til residualene syntes å minke nevneverdig. X-residualene forble høye i modellen ifra Oslo-området.

Residualene som her rapporteres, utenom nevnte eksempel, er i tråd med tilsvarende arbeider med ASTER utført andre steder. Tabell 6.1 nedenfor viser et utvalg av resultatene disse arbeidene presenterer.

Tabell 6.1: Eksempler fra litteraturen. Det er viktig å presisere at i disse eksemplene er forskjellig programvare og parametere benyttet. Dessuten kan topografien i hvert enkelt datasett variere en del.

| Referanse              | Kontrollpunkter |            |            |             | Sjekkpunkter |            |            |
|------------------------|-----------------|------------|------------|-------------|--------------|------------|------------|
|                        | $\Delta X$      | $\Delta Y$ | $\Delta Z$ | $\Delta XY$ | $\Delta X$   | $\Delta Y$ | $\Delta Z$ |
| Toutin og Cheng (2002) | 10.7            | 5.6        | 8.5        |             | 15.8         | 10.5       | 7.9        |
| Toutin (2002)          | 16.9            | 14.3       | 14.7       |             | 18           | 17         | 20         |
| Hirano et al. (2003) * |                 |            |            | 6 - 20      |              |            | 9 - 26     |

\* Denne artikkelen inneholder datasett fra flere lokaliteter.

## 6.2 Editering av høydemodellene

Den innebygde automatiske editeringen som PCI benyttet for å glatte modellen og tette igjen hull i modellen etter matchingen, resulterte i en høydemodell som var langt ifra tilstrekkelig god. Manuell editering var helt nødvendig for å fjerne de ekstreme avvikene, såkalte blundere, som fantes i alle modellene.

Metodene som ble benyttet var en blanding av automatiske innebygde metoder og manuelle metoder som baserte seg på skjønn ifra operatøren sin side.

Hele Orthoengine programvaren er bygget opp slik at operatøren skal kunne gjøre minst mulig. Derfor er det ikke lagt opp til at man for eksempel

skal kunne gå inn å endre på enkelte parameterne i de forskjellige editeringsmetodene.

Det innebygde støyfjerningsfilteret fungerte ikke særlig godt da det fant svært få piksler som den karakteriserte som støy eller klare avvik.

Utjevningen av modellen som skulle fjerne mindre og systematisk støy, jevnet samtidig ut enkelte strukturer som representerte virkelige objekter. Dette var tydeligst i smale elvedaler i Oslo-området (fig. 5.4 s. 42). De innebygde lavpassfiltrene var beregnet å skulle benyttes gjentatte ganger på modellen for å få best mulig resultat. Det var derfor vanskelig å avgjøre hvor mange ganger de skulle benyttes for å oppnå og fjerne mest mulig av blunderne samtidig som man beholdt viktige detaljer i høydemodellen. Et bedre (og mer tidkrevende) alternativ ville vært å benytte filtre som beholdt skarpe kanter samtidig som de glattet ut mindre ujevnheter ((Giles og Franklin 1996)).

Siden den topografiske referansemodellen inneholder langt flere detaljer, egner den seg til kartlegging på en større skala enn ASTER modellen.

Ekstreme avvik eksisterte i alle de tre modellene ifra Jostedalsbreen. Dette førte til at RMSE verdiene gav et galt bilde av nøyaktigheten i modellene. En bedre metode for å finne ekstreme avvik enn de innebygde metodene ville derfor vært til stor nytte.

Tabellene 5.2 og 5.3 viser at graden av prosessering bedret kvaliteten i høydemodellene betraktelig. Unntaket er mellom den uediterte JDHM1 og de editerte modellene ifra Jostedalsbreen. Ved å ta med punkter der korrelasjonene feilet, minket den absolutte nøyaktigheten. Samtidig utgjorde disse punktene en så stor del av modellen (fig. 4.5 s. 29), at anvendelsesområdene for denne modellen ville vært svært begrensede. Siden den heller ikke ble glattet, var forholdet mellom punktene i modellen helt feil. Dette viser at de automatiske editeringsmetodene ikke bare tettet *hull* i modellen, men også introduserte nye til dels alvorlige feil. Grundig sjekk og manuell editering er derfor helt nødvendig for å få en god modell.

## 6.3 Kvalitetsanalyse av høydemodellene

### Absolutte feil

Høydene i ASTER modellen ifra Jostedalsbreen stemte relativt godt overens med høydene i referansemodellen i flate partier oppe på fjellet, der det ikke var is, og nede i dalbunnen. Generelt inneholdt partier dekket av breen og bratte helninger størst avvik. Likevel var den globale RMSE verdien på 59 meter relativt høy. Tidligere forsøk på å generere høydemodeller fra ASTER

melder om nøyaktigheter på mellom 50 - 60 meter i kuperte fjellområder, mens verdiene i slakere områder stort sett har ligget mellom 10 - 20 meter (tabell 6.3). Hovedårsaken til dette høye avviket skyldtes nok de topografiske forholdene i området, samt breen som dekket ca. to tredjedeler av scenen. Disse faktorene til sammen skapte det som gjerne kalles et *worst case scenario* for høydemåling ifra satellittbilder. En del av feilene burde vært rettet opp under editeringen av høydemodellen. I områdene der differansene lå innenfor 3 standardavvik(53 meter) var RMSE-verdien 34 meter.

Avvikene var nært bundet til helningsgradienten(fig. 5.13 s.49). Dette kan delvis forklares med horisontale avvik mellom ASTER modellene og referansem modellene, skapt av usikkerhet i kontrollpunktene. En annen forklaring er at bratte helninger gir problemer for stereokorrelasjonen som følge av; lav kontrast, skygge-effekter og felter som ikke kan avbildes av den bakoverpekende sensoren(Kamp et al. (2003), Kääb (2002), Kääb et al. (2002)). Toutin (2002), Toutin og Cheng (2002) viser at sammenhengen mellom høydenøyaktighet og helning nesten er lineært korrelert og hevder at årsaken til dette er effekter relatert til de bidireksjonale reflektans distribusjons funksjonene (BRDF) og lokal topografi. Interpolasjonsmetodene som ble benyttet var ofte ikke i stand til å rette opp feilene i disse områdene(fig. 4.5, s. 29). Histogrammet med avvik innenfor de ulike aspektklassene i figur 5.14 på side 49 viser at avvikene var klart størst i nord og nordøstlig helninger. Tendensen til høyere avvik i østlige helninger antas å komme av at ASTER satellittens bane har en inklinasjonsvinkel på 98.2° og, kanskje enda viktigere, at vnir teleskopet var dreid 8.5° på tvers av banen, østlig retning, under opptaket.

En måte å vurdere den horisontale forskyvningen mellom datasettene, er å se på resultatene i de uavhengige sjekkpunktene fra selve oppsettet av stereomodellen. Tillegg A.1 og tillegg A.2 ifra henholdsvis Oslo-området og Jostedalsbreen inneholdt sjekkpunkter med opptil ca. 30 meter(2 piksler) avvik i grunnriss. Avhengig av retningen på det horisontale avviket i forhold til aspekt og helningsgradient, vil et avvik på kun få meter kunne få stor betydning for det beregnede høydeavviket. Gitt at det horisontale avviket er i samme retning som den bratteste helningen kan høydeavviket enkelt beregnes i en dimensjon som i formel 6.1 nedenfor:

$$\delta z = \delta x \tan(\alpha) \quad (6.1)$$

I ASTER modellen ifra Oslo-området, hadde ofte små daler og fordypninger i terrenget en side med negative avvik, mens den andre inneholdt kun positive(fig. 5.6 s. 43). I profil A i tillegg 5.8 kan det se ut som om ASTER modellen er noe forskjøvet i vestlig retning. Det støttes av histogrammet over avvikene innenfor de ulike aspektklassene(fig. 5.11 s. 47). Middelverdien til

avvikene i de vestvendte helningene var klart negativ. Den beregnede middelerdien for østvendte helninger var marginalt positiv. Samlet sett viste histogrammet at middelerdiene var korrelert med aspekt.

Tabell 6.2: RMSE DHM Eksempler fra litteraturen. Det er viktig å presisere at datasettene disse resultatene er hentet ifra er blitt generert med svært ulike metoder ifra lokaliteter med ulike topografi.

| Referanse              | RMSE XYZ (meter)                    | Metode                       |
|------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| Cuartero et al. (2004) | 12.6 <sup>a</sup> 34.8 <sup>b</sup> | 315 DGPS punkter             |
| Hirano et al. (2003)   | 7 - 15                              | Flere ulike                  |
| Kääb (2002)            | 18 - 60                             | Fotogrammetrisk DHM          |
| Toutin (2002)          | 51 <sup>c</sup>                     | Topografisk DHM              |
| Toutin og Cheng (2002) | 17 <sup>c</sup>                     | 150,000 punkter fra USGS DEM |

<sup>a</sup> PCI Geomatica Orthoengine

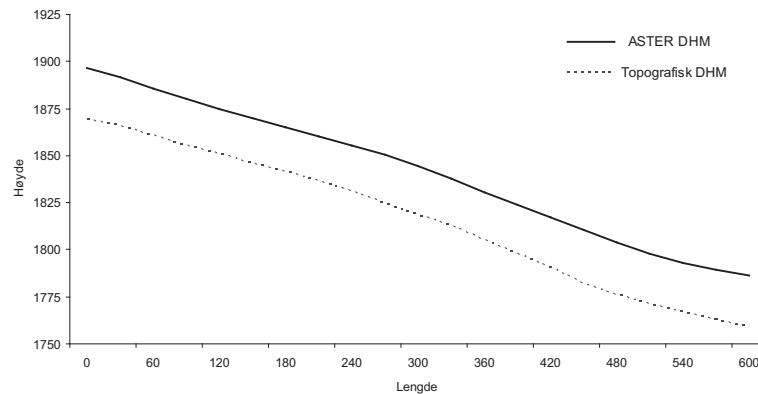
<sup>b</sup> Erdas Imagine Orthobase

<sup>c</sup> 90 prosent konfidensintervall

I den endelige høydemodellen ifra Oslo-området ble den globale absolutte nøyaktigheten målt til å være 11 meter (RMSE). Dette er bedre enn flere av eksemplene ifra litteraturen i tabell 6.3 og den potensielle nøyaktigheten som beskrives i avsnitt 2.2.4. Med en tilnærmet middelerdi på -1 meter, inneholdt heller ikke modellen noe signifikant globalt systematisk avvik. Det klassifiserte differansemodellen (fig. 5.3 s. 41) avslører derimot at store områder i begge ender av ASTER modellen ligger systematisk lavere enn referansemodellen. Det har ikke lyktes å finne noen forklaring på dette.

Det kunne ikke påvises noen sammenheng mellom skogdekke og negative avvik. Områdene klassifisert som skog inneholder nok en del spredt skogvekst, det er mulig det ville gjort utslag hvis kun soner med høy og tett skog hadde vært tatt med. Derimot lå områder klassifisert som bebyggelse systematisk høyere. Dette var forventet siden høydene i referansemodellen referer til bakkenivå mens ASTER måler høyder oppå bygninger.

I motsetning til modellen ifra Oslo inneholdt modellen ifra Jostedalsbreen et betydelig globalt avvik (-21 meter). Både differansemodellen (fig. 5.6 s. 43) og markslagshistogrammet (fig. 5.15 s. 50) viste at breen hadde størst betydning for dette avviket. I profilene på figur 5.9 på side 46 er det tydelig hvordan ASTER-profilene ligger høyere enn referanseprofilene over breene, mens det jevner seg ut nede i dalsidene. Grunnet lengden på profilene kommer dette ikke så tydelig frem, derfor er en del av profil A forstørret i figur 6.1. Dette profilet viser at ASTER modellen ligger mer 20 meter høyere enn referansemodellen over breen.

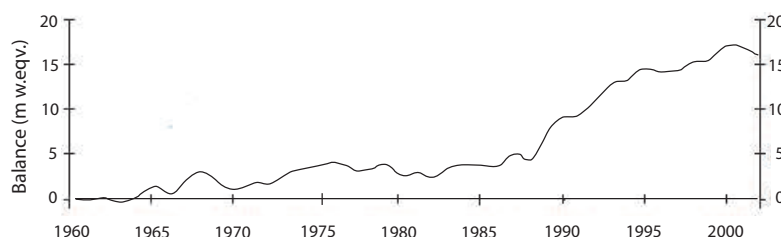


Figur 6.1: Høydeprofil fra Jostedalsbreen. Profilen er et utdrag av den høyest beliggende delen av profil A, fra Bergsetbreen, i tillegg 5.9 på side 46.

I perioden mellom opptakene som har dannet grunnlaget for modellene har det vært en generell økning i bremassen. Den originale konstruksjon av høydekurvene, som danner grunnlaget for referansemodellen, er basert på flybilder ifra 1966. Disse kurvene har igjen blitt oppdatert ved hjelp av flybilder ifra 8. september 1993. Massebalansemålinger ved utløperne til Jostedalsbreen viser generelt en kraftig økning i bremassen gjennom 90-årene (Kjøllmoen 2001). Målinger hovedsakelig utført av NVE viser at Nidgardsbreen i perioden 1993 - 2000 hadde en kumulativ nettobalanse i underkant av 5 meter (vannekvivalenter). Tilsvarende tall for Austdalsbreen og Tunsbergdalsbreen var henholdsvis tilnærmet 0 og 3 meter. Gjennom hele perioden massebalansen er blitt målt på nidgardsbreen (1962-2003), er den kumulative massebalansen på mer enn 19 meter vannekvivalenter (Kjøllmoen 2004) (fig. 6.2).

Wangensteen et al. (2005) sammenliknet flere høydemodeller fra to av utløperne til Jostedalsbreen; Bergsetbreen og Nidgardsbreen. Han fant at Nidgardsbreen hadde en gjennomsnittlig økning i tykkelsen på 19.3 meter i perioden 1993 - 1997 og 5.2 meter fra 1997 til 2001. Bergsetbreen hadde ingen gjennomsnittlig signifikant økning men i fronten av breen ble det registrert høydeforskjeller på omkring 70 meter.

For å undersøke forandringene på breen nærmere ble det både ASTER modellen og referansemodellen sammenliknet med fotogrammetriske høydemodeller over to av utløperne til Jostedalsbreen; Bergsetbreen (fig. 5.20 s. 55) og Nidgardsbreen (fig. 5.21 s. 57). Som forventet lå den fotogrammetriske modellen en del høyere enn referansemodellen. Samtidig, noe uventet, var det et nesten like stort avvik mellom den fotogrammetriske modellen og modellen ifra ASTER, der denne viste seg å ligge enda høyere. Noe av dette syste-



Figur 6.2: Den kumulative nettobalansen for Nidgardsbreen 1963 - 2002. Figuren viser at Nidgardsbreen har hatt et stort overskudd i den kumulative massebalansen i denne perioden. Økningen har vært særlig stor siden 1988 (Modifisert figur ifra Kjøllmoen (2001)).

matiske avviket kan forklares med at ASTER opptaket var gjort året før og tidligere i smeltesesongen enn flybildene. Selv om det har vært lite endringer i massebalansen kan det i områder med snø, være store høydeforskjeller på grunn av forskjellig tetthet i snøpakken. Avvikene mellom ASTER modellen og den fotogrammetriske syntes å være størst høyt oppe på breene (fig. 5.20 og fig. 5.21). Det store avviket mellom modellene over Bergsetbreen skyldes nok at breen ligger i en ekstremt bratt østlig helning ( $27^\circ$ ), slik at de tidligere nevnte effektene knyttet til gradient og aspekt spiller inn. I figur 5.20 er det tydelig at ASTER modellen inneholder en del blundere i området over Bergsetbreen.

Siden referansemodellen ifra Jostedalsbreen helt tydelig inneholdt feil i høydeverdiene over breen, reflekterer ikke den beregnede RMSE-verdien det sanne potensialet for høydemåling i bratt terreng med bilder fra ASTER. RMSE verdien skulle derfor vært noe lavere enn 58 meter, slik den ble beregnet for Jostedalsbreen, i denne oppgaven.

### Relative feil

Den relative nøyaktigheten i høydemodellene ble i stor grad bestemt ut fra kvaliteten på resultatet etter stereokorrelasjonen. I Jostedalsbreen utgjorde snø sammen med firn og (i litt mindre grad) is underlag kjent for å skape problemer for stereokorrelasjonen på grunn av uniform refleksans (Kääb et al. 2002). Skyggemodellen ifra Jostedalsbreen (fig. 5.5 s. 5.5), viser tydelige ujevnheter oppe på isbreen der overflaten skulle vært langt jevnere.

I bratte helninger var den relative nøyaktigheten ofte svak. Helningsgrid fra begge studieområdene ble generert og sammenliknet med helningsgrid fra referansemodellene. Resultatene kunne si noe om de relative nøyaktighetene i ASTER modellene siden beregninger av helning er så følsomme for relative feil (Giles og Franklin 1996). Avvikene mellom helningsgridene var minst i re-

lativt moderate helninger, større i de flateste partiene, og aller størst i relativt bratte helninger. Dette var tendensen i begge områdene selv om resultatene ikke kunne sammenliknes direkte (fig. 5.16 s. 51 og fig. 5.17 s. 51). Disse resultatene stemmer noenlunde godt med hva andre har kommet frem til. Sasowsky et al. (1992), Carter (1988) rapporterer at DEM er mindre nøyaktige i slake helninger og i områder med komplekst relief, enn i bratte skråninger. Bolstad og Stowe (1994) vurderte en høydemodell generert i fra SPOT bilder, og fant at helningsavvikene var størst i bratte skråninger. Han pekte på at dette hovedsakelig skyldtes røffere terreng og mer skog (korrelasjonsproblemer) enn i de flatere partiene.

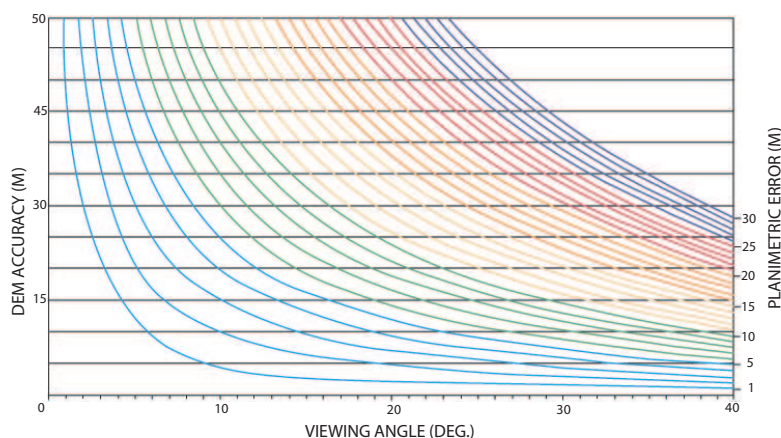
Oslo-området inneholder verken store områder med uniform reflektans eller særlig bratte helninger (store vann ble maskert ut). Dette resulterte i at en stor andel av pikslene ble riktig korrelert (99%), og høydemodellen ifra Oslo fikk langt færre områder med ekstreme avvik enn modellen ifra Jostedalsbreen. Det som fikk størst betydning for den relative nøyaktigheten i Oslo-modellen var kvaliteten på filtrere og metodene som ble brukt for å glatte modellen. Tendensen var at for mye ble filtrert bort. Konsekvensen av dette sees tydelig i beregningene av tilsigsområde og wetness indexen (fig. 5.18 s. 53); dreneringen ble samlet i færre og større avløp, og store felter fikk tildelt lik, høy, wetness index. Tillegg 5.8 viser at profilene ifra ASTER modellen gjerne ligger høyere over trange sprekker mens de kutter rygger og topper i landskapet.

Etter stereokorrelasjonen, før noe editering på modellene var utført, var den relative nøyaktigheten i ASTER modellene helt tydelig svakere enn hva man kan forvente å finne for eksempel i et 1:50,000 kart. Fjerning av blundere og glatting var helt nødvendig for å heve kvaliteten opp til et akseptabelt nivå. I forbindelse med glattingen bør det fokuseres mer på å finne frem til filtre som er tilpasset topografien (skalaen) i landskapet.

## 6.4 Anvendelsesområder for ASTER DHM

Visualisering av forskjellige geografiske problemstillinger kan være et viktig og kraftig hjelpemiddel i sammenhenger der disse skal kommuniseres. Med muligheter for stereo-opptak sammen med opptak i flere bånd er ASTER systemet velegnet for en rekke ulike visualiseringsoppgaver. Høydemodellene generert fra stereo-opptakene kan benyttes til å orthorektifisere bilder fra ASTER-båndene eller fra andre kilder. Denne og andre oppgaver har vist at høydemodellene ifra ASTER kan ha en nøyaktighet på ned mot  $\pm 12$  meter under optimale forhold. Røffere terreng kan gi RMSE avvik opp mot  $\pm 60$  meter. I et ASTER opptak der opptaksvinkelen er innefor  $\pm 8.5^\circ$  vil disse





Figur 6.3: Generering av orthobilde. Forholdet mellom nøyaktighet i høydemodell(meter), opptaksvinkelen til bildet som skal orthorektifiseres(grader) og det resulterende horisontale avviket(meter) i orthobildet((Toutin 1995)).

høydeavvikene resultere i planimetriske avvik i orthobildet på henholdsvis omtrent innenfor 2 og 10 meter(fig. 6.3). Kääb et al. (2002) viste at orthorektifisering med høydemodeller der RMSE-avvikene var 18 og 60 meter gav horisontale avvik i orthobildene på henholdsvis 2.5 meter og 8 meter gitt at opptaksvinkelen var  $8.5^\circ$ . Ved å drapere orthobilder over høydemodellene kan man generere perspektivbilder som er enkle og intuitive å forstå selv for uerfarne brukere (tillegg og tillegg B.1).

Det kartografiske potensialet til høydemodeller ifra ASTER kan beskrives ved å angi innenfor hvilke målestokker dataene egner seg til kartlegging. Hirano et al. (2003) konkluderer med at ASTER data egner seg for topografisk kartlegging i områder med høyt relieff innenfor en skala av 1:50,000 til 1:100,000 med koteintervaller på 40 meter eller mer. Flere andre hevder liknende potensial(Welch et al. (1998), Toutin og Cheng (2002)). Resultatene i denne oppgaven var i overensstemmelse med tidligere resultater ifra andre forfattere. Samtidig er det verdt å merke seg at nøyaktigheten i høydemodellene kan variere svært mye avhengig av topografien i det aktuelle området. Ved å sammenlikne RMSE-verdiene ifra de to studieområdene er det klart at høydemodellen ifra Oslo-området(11 meter) egner seg til kartlegging i en høyere målestokk enn høydemodellen ifra Jostedalsbreen(58 meter).

Innen geomorfometrisk analyse er det helt avgjørende at naboskapsforholdene i høydemodellene som benyttes er tilnærmet riktige. Giles og Franklin (1996), Bolstad og Stowe (1994) peker på at første og andre ordens topografiske parametre trukket ut fra høydemodeller inneholder signifikante feil. Resultatene i denne oppgaven gir ingen grunn til å anta noe annet. Høydemodellene inneholdt, som nevnt, en del artefakter som i høy grad ville kunne

påvirke resultatene i en geomorfometrisk analyse. I den beregnede wetness indeksen ifra Jostedalsbreen skapte en slik artefakt et kunstig dreneringsløp nedover fjellsida, mens et annet dreneringsløp forsvant (fig. 5.19 s. 54). Hvorvidt data ifra ASTER egner seg som input i en analyse avhenger selvfølgelig av hvilken skala fenomenet man ønsker å studere befinner seg i. Det ble ikke forsøkt å gjøre noen spesifikke undersøkelser av dette i denne oppgaven, det er derfor vanskelig å eksakt peke på noen bestemt målestokk. Som nevnt viste resultatene at utstrakt glatting av modellene måtte til for å bedre den relative nøyaktigheten. Glattingen førte til en generalisering av landskapet slik at skalaen minket. Resultatet ble en høydemodell som inneholdt klart færre detaljer enn referansemodellen som er generert ut fra et 1:50000 kart.

Den rimelig prisen, forholdsvis enkle metoden for å fremstille høydemodellene sammen med kvaliteten det er mulig å oppnå, gjør at høydemodeller ifra ASTER kan benyttes som et rekognoseringsverktøy for raskt å kunne lokalisere aktuelle studieområder.

Massebalansen på breer kan måles ved hjelp av fjernanalyse i form av flybilder (Etzelmuller og Sollid (1996), Wangensteen et al. (2005)) eller satellittbilder. Nøyaktigheten på massebalansemålingene fremskaffet ved å differensiere mellom høydemodeller kan beregnes med likningen (Etzelmuller og Sollid 1996):

$$m_u = \sqrt{\left(\frac{\delta u}{\delta x} \cdot m_x\right)^2 + \left(\frac{\delta u}{\delta y} \cdot m_y\right)^2 + \dots} \quad (6.2)$$

Her er  $x$  og  $y$ , uavhengige og normalfordelte, kontinuerlig målte variable. Gitt funksjonen  $u = f(x, y, \dots)$ , er  $m_x$  og  $m_y$  standardavvikene til henholdsvis  $x$  og  $y$ .

I denne oppgaven ble standardavviket til høydemodellen over Jostedalsbreen beregnet til å være 53 meter (tab. 5.3 s. 39). Dette standardavviket ble beregnet for hele modellen, og gir derfor ikke et riktig bilde av den reelle nøyaktigheten til høydeverdiene på breene. I mangel av sikre høydedata ifra tidspunktet for ASTER opptaket vil differansen mellom ASTER modellen og den fotogrammetriske gi det beste estimatet. Selv om tidsdifferansen mellom opptakene var tilnærmet ett år, gav høydedifferansene mellom ASTER modellen og den fotogrammetriske over Bergsetbreen i Tab. 5.5.1 og Nidgardsbreen i Tab. 5.5.2 standardavvik på henholdsvis 15 og 12 meter. Oppe på breen, der det er mer snø som gir lav kontrast, vil standardavviket være noe høyere. Under gode forhold antas det derfor at et standardavvik innenfor 15 - 25 er oppnåelig. I følge likning 6.2 må derfor målte høydeforskjeller på en bre være mellom 21- 35 meter for at resultatet skal være signifikant. Dette forteller at ASTER-bilder ikke kan benyttes til å måle årlige variasjoner på

breer. På steder der man har høydemålinger som går flere år tilbake i tid, slik som på Nidgardsbreen, kan derimot høydemodellen gi en indikasjon på forandringene som har skjedd under perioden (fig. 5.21 s. 57 og fig. 5.20 s. 55). I områder der det er vanskelig å få tilgang til flybilder kan bilder ifra ASTER være en mulig kilde til målinger av langvarige trender i massebalansen på breer.

Isteden for å måle høydeforskjellen på breer direkte, kan høydemodellene benyttes til å orthorektifisere satellittbilder som deretter benyttes til å måle hastigheter på breer og endringer i frontposisjonen (Kääb 2002).



## 7 Konklusjon

Det er i denne oppgaven sett på kvaliteten på høydemodeller generert fra ASTER opptak. Til arbeidet med fremstillingen av modellene ble PCI Orthoengine V.8.3 benyttet. Det ble generert høydemodeller ifra to områder med forskjellig topografi og markslag for å kunne gi en mer helhetlig kvalitetsvurdering.

Høydemodeller ifra ASTER er relativt nøyaktige i flatt terreng og slake helninger. Bratte skråninger, skyggeområder og steder med uniform refleksans generelt, slik som snødekke, gav opphav til svært dårlige resultater. I slike områder kunne ekstreme feil komme opp i over hundre meter. Globalt sett viste resultatene at en RMSE nøyaktighet på 11 meter og i underkant av 58 meter var oppnåelig for henholdsvis relativt slakt og bratt terreng.

Høydemodellene var for unøyaktige til at de kunne benyttes til å måle årlige høydevariasjoner på isbreer. Hvis perioden imellom opptakene er lengre og variasjonen er stor nok ( $>25$  meter), kan høydemålinger ifra ASTER gi tydelige indikasjoner på om breer vokser eller trekker seg tilbake.

På grunn av sine multispektrale egenskaper sammen med muligheten for samtidige stereo-opptak, egner ASTER-systemet seg godt til visualiserings oppgaver. Høydemodeller ifra ASTER kan benyttes til å generere orthobilder der usikkerheten i høydemodellen overføres til planimetriske avvik på mellom 2-10 meter.

ASTER kan ikke konkurrere med produktene ifra de siste høyoppløselige satellittene eller ifra tradisjonelle flybilder når det gjelder nøyaktighet. Den leverer isteden et langt rimeligere alternativ til disse der kravet til kvalitet er noe lavere.



# Referanser

- Abrams, M. (2000). The advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer ASTER: data products for the high spatial resolution imager on nasa's terra platform, *International Journal of Remote Sensing* **21**: 847–859.
- AlRousan, N., Cheng, P., Petrie, G., Toutin, T. og Zoej, M. (1997). Automated DEM extraction and orthoimage generation from SPOT Level 1B imagery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **63**: 965–974.
- AlRousan, N. og Petrie, G. (1998). System calibration, geometric accuracy testing and validation of dem & orthoimage data extracted from spot stereopairs using commercially available image processing systems, *International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing* **34**: 8–15.
- Asterweb (2004). Aster instrument subsystems [online], Tilgjengelig fra: <http://asterweb.jpl.nasa.gov/instrument.asp> [Hentet 25. Aug. 2004].
- Beven, K. og Kirby, M. (1979). A physically-based variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrological Sciences* **24**: 303–325.
- Bolstad, P. og Stowe, T. (1994). An evaluation of dem accuracy - elevation, slope, and aspect, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **60**: 1327–1332.
- Burrough, P. (1986). *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*, Oxford University Press, chapter 5, pp. 121–131.
- Carter, J. R. (1988). Digital representations of topographic surfaces, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **54**: 1577–1580.
- Cuartero, A., Felicísimo, A. M. og Ariza, F. J. (2004). Accuracy of dem generation from terra-aster stereo data, *IAPRS & SIS*, Vol. 35, pp. 225–260.

- (ERSDAC), E. R. S. D. A. C. (2003). *ASTER Users Guide, Part II, Level 1 Data Products*, 4 edn.
- Etzelmuller, B. og Sollid, J. (1996). Long-term mass balance of selected polythermal glaciers on spitsbergen, svalbard, *Norsk geografisk tidsskrift* **50**: 55–67.
- Etzelmuller, B. og Sulebak, J. R. (2000). Developments in the use of digital elevation models i periglacial geomorphology and glaciology, *Physische Geographie* **41**: 35–58.
- Evans, I. (1972). General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics, in R. Chorley (ed.), *Spatial Analysis in Geomorphology*, Methuen & Co., Ltd., London, chapter 2, pp. 17–90.
- Evans, I. (1980). An integrated system of terrain analysis for slope mapping, *Zeitschrift für Geomorphologie / Supplement* **36**: 274–295.
- Felcísimo, A. M. (1994). Parametric statistical method for error detection in digital elevation models, *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **49**(4): 29–33.
- Florinsky, I. G. (1998). Accuracy of local topographic variabels derived from digital elevation models, *International Journal of Geographical Information Systems* **12**(1): 47–61.
- Giles, P. og Franklin, S. (1996). Comparison of derivative topographic surfaces of a DEM generated from stereoscopic SPOT images with field measurements, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **62**: 1165–1171.
- Gonzalez, R. og Woods, R. (1992). *Digital Image Processing*, 2 edn, Addison-Wesley.
- Gugan, D. og Dowman, I. (1988). Topographic mapping from spot imagery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **54**: 1409–1414.
- Hannah, M. (1981). Error detection and correction in digital terrain models, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **47**(1): 63–69.
- Heipke, C. (1995). State-of-the-art of digital photogrammetric workstations for topographic applications, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **61**(1): 49–56.



- Hirano, A., Welch, R. og Lang, H. (2003). Mapping from aster stereo image data: Dem validation and accuracy assessment, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **57**: 356–370.
- Kamp, U., Bolch, T. og Olsenholler, J. (2003). Dem generation from aster satellite data for geomorphometric analysis of cerro sillajhuay, chile/bolivia, *Annual Meeting Imaging and Geospatial Information Society*, ASPRS Proceedings, Anchorage, U.S.A.
- Kääb, A. (2002). Monitoring high-mountain terrain deformation from repeated air- and spaceborne optical data: examples using digital aerial imagery and ASTER data, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **57**: 39–52.
- Kääb, A., Huggel, C., Paul, F., Wessels, R., Raup, B., Kieffer, H. og Kargel, J. (2002). Glacier monitoring from aster imagery: accuracy and applications, *LISSIG-Workshop Observing our Cryosphere from Space*, EARSeL Proceedings, Bern.
- Kjøllmoen, B. (2001). Glaciological investigations in norway in 2000, *Technical Report 2*, Norwegian Water Resources and Energy Directorate(NVE), Oslo, Norway.
- Kjøllmoen, B. (2002). Glaciological investigations in norway in 2001, *Technical Report 3*, Norwegian Water Resources and Energy Directorate(NVE), Oslo, Norway.
- Kjøllmoen, B. (2004). Glaciological investigations in norway in 2003, *Technical Report 4*, Norwegian Water Resources and Energy Directorate(NVE), Oslo, Norway.
- Lang, H. R. og Welch, R. (1999). *Algorithm Theoretical Basis Document for ASTER Digital Elevation Models*, 4 edn, EOS Project Science Office.
- Li, R. (1998). Potential of high-resolution satellite imagery for national mapping products, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **64**(12): 1165–1169.
- Moore, I., Gessler, P., Nielsen, G. og Peterson, G. (1993). Soil attribute prediction using terrain analysis, *Soil Science Society of America Journal* **57**: 443–452.
- Moore, I., Grayson, R. og Ladson, A. (1991). Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications, *Hydrological Processes* **5**: 3–30.

- Sasowsky, K., Petersen, G. og Evans, B. (1992). Accuracy of spot digital elevation model and derivatives - utility for alaska north slope, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **58**: 815–824.
- Shary, P. (1995). Land surface in gravity points classification by complete system of curvatures, *Mathematical Geology* **27**: 373–390.
- Statens Kartverk (2001a). Dtm digital terrengmodell, Statens Kartverk.
- Statens Kartverk (2001b). Kvalitetssikring av oppmåling, kartlegging og geodata (geodatastandarden), Statens Kartverk. 75 Sider.
- Statens Kartverk (2002). N5 rasterdata, Statens Kartverk.
- Statens Kartverk (2003). N50 kartdata versjon 2003, Statens Kartverk.
- Toutin, T. (1995). Multisource data fusion with an integrated and unified geometric modelling, *EARSeL Advances in Remote Sensing* **4**(2): 118–129.
- Toutin, T. (2001). Elevation modelling from satellite visible and infrared (VIR) data, *International Journal of Remote Sensing* **22**: 1097–1125.
- Toutin, T. (2002). Three-dimensional topographic mapping with ASTER stereo data in rugged topography, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **40**: 2241–2247.
- Toutin, T. og Cheng, P. (2002). Comparison of automated digital elevation model extraction results using along-track ASTER and across-track SPOT stereo images, *Optical Engineering* **41**: 2102–2106.
- Wangensteen, B., Kääb, A., Tønsberg, O. og Eiken, T. (2005). Volume change and high resolution surface velocities for some advancing outlets of jostedalsbreen from digital photogrammetry. (paper in prep.).
- Weibel, R. og Heller, M. (1991). Digital terrain modelling, in M. G. D.J. Maguire og D. Rhind (eds), *Geographical Information Systems: Principles and Applications*, Longman, London, chapter 19, pp. 269–297.
- Welch, R. (1989). Desktop mapping with personal computers, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **55**: 1651–1662.
- Welch, R., Jordan, T., Lang, H. og Murakami, H. (1998). Aster as a source for topographic data in the late 1990's, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* **36**: 1282–1289.

- Wilson, P. og Gallant, C. (2000). *Terrain analysis: principles and applications*, John Wiley & Sons, Ltd., chapter 1, pp. 1–28.
- Wolf, P. (1974). *Elements of Photogrammetry*, McGraw-Hill, Inc.
- Zevenbergen, L. og Thorne, C. (1987). Quantitative analysis of land surface topography, *Earth Surface Processes and Landforms* **12**: 47–56.



# A Oppsett av stereomodell

## A.1 Oslo-området

| Point | Diff   | Diff X  | Diff Y  | Diff Z  | Type | Input X    | Input Y     | Input Z |
|-------|--------|---------|---------|---------|------|------------|-------------|---------|
| G0012 | 20.727 | 19.772  | -6.092  | -1.240  | GCP  | 590275.872 | 6661057.311 | 349.000 |
| G0016 | 15.964 | -15.648 | 1.268   | -2.894  | GCP  | 615267.864 | 6649098.356 | 109.000 |
| G0026 | 14.481 | -11.867 | 4.333   | -7.078  | GCP  | 582228.749 | 6660731.779 | 500.000 |
| G0015 | 12.879 | -4.807  | -0.061  | -11.949 | GCP  | 603677.520 | 6650531.565 | 248.000 |
| G0001 | 12.515 | 5.730   | -4.189  | 10.308  | GCP  | 637559.163 | 6658852.632 | 190.000 |
| G0005 | 12.204 | -2.640  | -1.441  | 11.828  | GCP  | 584359.303 | 6674329.150 | 502.000 |
| G0002 | 11.459 | -2.684  | 7.717   | -8.034  | GCP  | 637253.747 | 6658927.196 | 190.000 |
| G0013 | 10.372 | 8.903   | -5.306  | -0.407  | GCP  | 592912.537 | 6638201.442 | 0.000   |
| G0006 | 9.022  | 3.415   | 2.819   | 7.860   | GCP  | 584094.898 | 6673599.335 | 503.000 |
| G0004 | 8.142  | 7.080   | 3.091   | 2.571   | GCP  | 623325.802 | 6602461.221 | 25.000  |
| G0003 | 7.617  | -4.526  | -3.306  | 5.157   | GCP  | 624251.601 | 6603523.576 | 119.000 |
| G0007 | 7.374  | -1.170  | 7.016   | 1.945   | GCP  | 567654.000 | 6623387.000 | 3.000   |
| G0009 | 5.597  | 1.100   | -2.279  | -4.992  | GCP  | 607108.138 | 6664587.880 | 312.500 |
| G0008 | 5.414  | -2.672  | -3.562  | -3.079  | GCP  | 569596.561 | 6622287.309 | 0.500   |
| G0018 | 46.665 | -28.088 | 7.236   | -36.555 | ICP  | 626198.957 | 6652057.154 | 104.000 |
| G0014 | 39.570 | -37.016 | 2.580   | -13.745 | ICP  | 614433.684 | 6629832.327 | 223.000 |
| G0023 | 37.612 | -34.100 | 5.162   | -15.008 | ICP  | 608289.837 | 6626916.702 | 126.000 |
| G0027 | 37.161 | -6.372  | 31.822  | -18.103 | ICP  | 599118.164 | 6643914.268 | 33.000  |
| G0019 | 34.247 | -31.433 | 11.466  | -7.305  | ICP  | 619827.543 | 6618398.241 | 162.000 |
| G0011 | 30.632 | -18.385 | 18.568  | -15.986 | ICP  | 627135.912 | 6643126.467 | 217.000 |
| G0020 | 30.452 | -15.664 | 11.751  | -23.321 | ICP  | 605503.442 | 6642319.864 | 280.000 |
| G0021 | 24.984 | 20.767  | -2.610  | -13.643 | ICP  | 587017.064 | 6638027.037 | 0.000   |
| G0025 | 24.431 | 16.840  | -3.845  | -17.278 | ICP  | 598309.388 | 6665446.124 | 340.500 |
| G0010 | 24.144 | -7.555  | -6.321  | -22.043 | ICP  | 600990.647 | 6630450.619 | 95.000  |
| G0017 | 18.923 | 8.787   | -12.056 | -11.642 | ICP  | 588023.760 | 6648762.411 | 215.500 |
| G0022 | 13.895 | 5.414   | -4.448  | -11.999 | ICP  | 587158.429 | 6620517.045 | 0.000   |
| G0024 | 12.251 | 9.990   | -2.291  | -6.711  | ICP  | 598960.177 | 6651719.024 | 148.000 |

## A.2 Jostedalsbreen

| Point | Diff   | Diff X  | Diff Y  | Diff Z  | Type | Input X    | Input Y     | Input Z  |
|-------|--------|---------|---------|---------|------|------------|-------------|----------|
| G0038 | 24.870 | -22.006 | 10.766  | -4.286  | GCP  | 392661.225 | 6822234.320 | 239.000  |
| G0020 | 24.811 | 7.529   | -15.695 | 17.680  | GCP  | 364645.334 | 6842259.587 | 726.000  |
| G0034 | 24.270 | -13.786 | 19.968  | -0.487  | GCP  | 396265.111 | 6847487.272 | 154.000  |
| G0017 | 21.247 | 15.305  | -6.694  | 13.130  | GCP  | 418258.000 | 6847049.000 | 889.756  |
| G0021 | 20.432 | -5.133  | 11.257  | -16.260 | GCP  | 399024.099 | 6822089.612 | 789.000  |
| G0037 | 20.233 | -15.301 | 13.103  | -1.888  | GCP  | 355857.067 | 6845744.833 | 941.000  |
| G0023 | 17.073 | 14.411  | 2.315   | 8.856   | GCP  | 363912.000 | 6861059.000 | 803.000  |
| G0040 | 14.343 | 7.833   | -3.738  | -11.420 | GCP  | 367574.336 | 6805989.337 | 860.000  |
| G0022 | 13.196 | -8.945  | -6.997  | -6.719  | GCP  | 366985.000 | 6861827.000 | 915.000  |
| G0042 | 12.830 | -2.897  | 1.473   | 12.411  | GCP  | 389161.332 | 6794653.812 | 890.000  |
| G0018 | 11.680 | 0.316   | -11.662 | -0.562  | GCP  | 415852.000 | 6845831.000 | 715.000  |
| G0036 | 11.195 | 9.225   | -1.090  | -6.249  | GCP  | 363392.633 | 6832814.333 | 740.000  |
| G0015 | 10.100 | 4.459   | -6.869  | 5.911   | GCP  | 390553.746 | 6795025.230 | 828.000  |
| G0009 | 9.691  | 4.306   | 2.472   | -8.322  | GCP  | 396028.822 | 6839717.431 | 1952.000 |
| G0011 | 7.568  | 0.894   | -3.542  | -6.627  | GCP  | 384397.967 | 6843335.677 | 38.000   |
| G0025 | 4.821  | 0.675   | -4.554  | 1.431   | GCP  | 378384.239 | 6833342.857 | 287.000  |
| G0032 | 3.908  | 3.254   | -0.706  | 2.046   | GCP  | 378544.354 | 6809780.904 | 23.000   |
| G0014 | 3.112  | 1.193   | -1.243  | 2.592   | GCP  | 342366.519 | 6814110.420 | 131.000  |
| G0013 | 2.365  | -1.366  | 1.458   | -1.266  | GCP  | 342037.523 | 6814449.583 | 131.000  |
|       |        |         |         |         |      |            |             |          |
| G0039 | 46.440 | -18.312 | 18.282  | -38.563 | ICP  | 381822.867 | 6825209.441 | 1675.000 |
| G0035 | 37.055 | -19.131 | 23.192  | -21.660 | ICP  | 394472.753 | 6847063.717 | 1280.000 |
| G0028 | 29.345 | 28.430  | -5.376  | -4.896  | ICP  | 365293.408 | 6827110.093 | 215.000  |
| G0033 | 27.694 | -6.766  | 17.468  | -20.397 | ICP  | 403358.243 | 6831864.228 | 1080.000 |
| G0010 | 24.650 | 18.070  | -15.612 | -6.112  | ICP  | 367250.527 | 6830806.137 | 203.000  |
| G0041 | 23.589 | -7.162  | -19.517 | 11.147  | ICP  | 363018.654 | 6853386.767 | 821.000  |
| G0002 | 23.103 | 21.239  | -8.785  | 2.337   | ICP  | 352532.108 | 6815278.897 | 826.000  |
| G0005 | 21.493 | 4.173   | -9.482  | 18.831  | ICP  | 398104.550 | 6804634.992 | 172.000  |
| G0008 | 19.623 | 3.485   | -17.535 | -8.091  | ICP  | 413267.916 | 6843412.985 | 500.000  |
| G0012 | 17.770 | -15.630 | 7.734   | -3.416  | ICP  | 406467.000 | 6831622.000 | 965.000  |
| G0007 | 17.465 | 2.877   | -1.562  | 17.156  | ICP  | 413003.630 | 6843161.543 | 500.000  |
| G0031 | 16.868 | 12.750  | -11.027 | -0.593  | ICP  | 372288.828 | 6848338.617 | 334.000  |
| G0027 | 16.682 | 13.045  | 10.376  | -0.690  | ICP  | 374222.552 | 6843512.528 | 325.000  |
| G0029 | 15.883 | 15.305  | 0.921   | 4.146   | ICP  | 364954.763 | 6814587.560 | 520.000  |
| G0030 | 15.257 | 11.690  | 9.046   | 3.779   | ICP  | 378153.062 | 6856429.282 | 585.000  |
| G0026 | 14.165 | -8.311  | 10.529  | -4.549  | ICP  | 383898.774 | 6816319.492 | 60.000   |
| G0001 | 12.600 | 5.569   | -11.302 | 0.064   | ICP  | 353856.994 | 6818387.573 | 552.000  |
| G0019 | 10.534 | 9.153   | -4.168  | -3.132  | ICP  | 362898.173 | 6846730.451 | 60.000   |
| G0024 | 3.843  | -1.633  | 3.212   | -1.337  | ICP  | 407181.544 | 6835948.351 | 787.000  |

## B 3D Visualisering av høydemodellene



Figur B.1: 3D visualisering av modellen fra Oslo-området. Orthorektifiserte bilder ifra ASTER båndene 1,2 og 3 er satt sammen og drapert over høydemodellen.





Figur B.2: 3D visualisering av modellen fra Jostedalsbreen.

